

# DIAGNÓSTICO E AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA DE ESTRUTURAS DE MADEIRA EXISTENTES

JOÃO TIAGO PEREIRA E CUNHA

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil – Ramo Construções

**Orientador:** Engenheiro Paulo Augusto Ribeiro Guedes

ISEP – Outubro 2013



*Mais do que Avós....Mais do que Padrinhos....Como uns verdadeiros Pais....*

*Saudade eterna!*





## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Eng. Paulo Guedes, pelo incansável apoio e conhecimentos partilhados, sendo um contributo essencial para conclusão deste trabalho através da sua postura rigorosa e atitude incentivadora. Apresentou uma permanente disponibilidade para o meu trabalho, fornecendo todo o auxílio necessário e tornando possível o cumprimento do meu objetivo. Um sincero Muito Obrigado!

Ao Eng. Duarte Barroso Lopes por todo o tempo despendido comigo e com o meu trabalho, partilhando os seus vastos conhecimentos sobre madeiras e mostrando total disponibilidade para esclarecer qualquer dúvida e ajudar na realização de todos os ensaios laboratoriais, tendo abdicado do seu tempo livre para participar em todos os ensaios realizados. Juntamente com o meu orientador foram pessoas determinantes neste trabalho.

À Sogrape Vinhos, S.A., agradeço pelo contributo fundamental para a realização deste trabalho através da total disponibilidade demonstrada, permitindo que as suas instalações fossem alvo de estudo da minha investigação. É de louvar todo o auxílio prestado a jovens investigadores. Em particular, o meu muito obrigado ao Eng. Pedro Pinto que recebeu e aprovou o meu pedido de utilização das instalações, mostrando total interesse no meu trabalho e pondo ao meu dispor todos os recursos existentes na Tanoaria Ferreira.

Ao Dr. Jorge Barreira, da Sogrape Vinhos, S.A., responsável pelo Departamento do Património da empresa, que mostrou total receptividade ao meu pedido de informações sobre as instalações alvo de estudo, partilhando todo o seu conhecimento e fornecendo informações essenciais para a realização deste trabalho.

Ao Sr. Manoel Oliveira, funcionário da Sogrape Vinhos, S.A., com o qual tratei de toda a calendarização das visitas às instalações. Um sincero agradecimento pela disponibilidade demonstrada, estando sempre recetivo às minha visitas, acompanhando-me sempre que possível ou pondo ao meu dispor outros funcionários da Tanoaria Ferreira quando não podia estar presente.

À minha família e amigos mais próximos, de quem frequentemente privei a minha companhia e dedicação, em especial à minha Mãe, por todo o apoio e palavras de motivação e encorajamento que me forneceu ao longo destas varias semanas de trabalho. Todas as minhas palavras são poucas para expressar a gratidão que sinto.

À Teresa pela compreensão, incentivos, dedicação e, acima de tudo, pelo apoio incondicional tendo, nos momentos de maior dificuldade, as palavras-chave para me dizer e relembrar que eu era capaz. Um profundo Muito Obrigado!

**Palavras-chave:** Pinho, Reabilitação, Caso de Estudo, Pavimento.

## RESUMO

A utilização da madeira enquanto material estrutural é um aspeto abordado com algum receio ou até desconhecimento por parte dos elementos intervenientes no processo de construção civil, sendo ainda uma área pouco lecionada e muitas vezes excluída dos planos curriculares em Engenharia Civil. Assim sendo é importante o surgimento de trabalhos relacionados com esta matéria, lembrando ao sector da construção civil e ao ramo de estudo relacionado, que a madeira já teve e possivelmente voltará a ter um papel importante a desempenhar na área da construção.

Um dos aspetos evidenciados nos estudos realizados consiste na importância da reabilitação de edifícios e do seu papel cada vez mais determinante na sociedade. Esta metodologia de intervenção apresenta-se muitas vezes como uma vantagem económica assim como contribui para a preservação do património arquitetónico e cultural, cujo valor histórico é incalculável. A importância da reabilitação de edifícios habitacionais nas zonas históricas, bem como de monumentos de grande importância cultural apresenta-se cada vez mais como um desafio devido à falta de conservação dos mesmos ao longo da sua vida útil, e da necessidade de preservar a identidade do local, beneficiando assim a qualidade do tecido urbano.

Assim sendo, este trabalho apresenta um levantamento dos danos possíveis de ocorrer em elementos de madeira, dando especial destaque aos agentes patológicos e às consequências da sua atividade na madeira assim como às metodologias de inspeção e diagnóstico que poderão ser aplicadas em estruturas de madeira existentes, favorecendo assim a vertente da

reabilitação ao invés da demolição. Estas metodologias recorrem a ensaios não destrutivos, como é exemplo o Pilodyn, o Resistógrafo, o Ultra-sons, etc., referindo também o recurso a ensaios destrutivos, cuja utilização terá de ser uma questão muito bem ponderada devido às consequências que implica.

Por fim, apresenta-se um caso real de estudo em que se analisa um pavimento em madeira através da aplicação de metodologias de ensaio não destrutivas e destrutivas a amostras recolhidas. O objetivo será determinar o estado de conservação da madeira e algumas características físicas tais como a sua densidade e os módulos de elasticidade, sendo posteriormente efetuada uma análise estrutural.

Os resultados obtidos permitem efetuar uma avaliação qualitativa do estado geral do pavimento sendo as principais conclusões que o pavimento se encontra atacado por parte de insetos xilófagos e apresenta problemas a nível de verificação a estados limite de utilização, deformação e vibração, fator que condiciona a possível utilização do pavimento.

**Keywords:** Pine, Rehabilitation, Case Study, Floor.

## **ABSTRACT**

The use of wood as a structural material is an aspect still approached with some trepidation or even ignorance by the elements involved in the process of construction, as it is an area which is not really taught and is often even excluded from the curriculum in Civil Engineering. Therefore, the emergence of works related to this matter is important, and one should remind the construction industry and the related branch of study of the fact that wood has had an important role to play in the construction area, and possibly will again.

One of the aspects highlighted in the studies carried out is the importance of the rehabilitation of buildings and their increasingly crucial role in society. This intervention methodology is often presented as an economic advantage, as well as a contribution to the preservation of the architectural and cultural heritage, of which the historical value is incalculable. The importance of the rehabilitation of residential buildings in historic areas, as well as monuments of great cultural importance is increasingly seen as a challenge due to the lack of preservation throughout their life and the need to preserve the identity of the place, thus benefiting the quality of the urban fabric.

Therefore, this work presents a survey of the damage likely to occur in wood elements, with particular attention given to pathogens and to the consequences of its activity in the wood, as well as the inspection and diagnosis methodologies that can be applied to existing timber structures, thus favoring rehabilitation instead of demolition. These methodologies use non-destructive testing, as exemplified by the Pilodyn, the Resistograph, Ultrasounds, etc., and

the use of destructive testing is also worth mentioning as it must well-studied due to its consequences.

Finally, was performed a case study which analyzes a wooden floor by applying methods of non-destructive and destructive testing on samples collected at the site being studied. The goal is to determine the condition of the wood and some physical characteristics such as density and modulus of elasticity, and a structural analysis will be performed at a later date.

The results obtained allow for the carrying out and provision of a qualitative assessment of the overall condition of the pavement to the property owner, being the main conclusions that the floor is attacked by insects and wood presents problems in checking the serviceability limit states, deformation and vibration, factor that determines the possible use of the pavement.

## ÍNDICE TEXTO

1.	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Considerações Gerais.....	1
1.2	Objetivos .....	2
1.3	Organização da Dissertação .....	3
2	VERIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL.....	5
2.1	Conceitos gerais .....	5
2.1.1	Vida útil das construções .....	5
2.1.2	Classes de serviço (EC5) .....	6
2.1.3	Classe de duração das ações .....	7
2.2	MODELO DE CÁLCULO ESTRUTURAL .....	7
2.3	VERIFICAÇÕES DE SEGURANÇA.....	8
2.3.1	Estados limite último.....	9
2.3.1.1	Combinação de ações.....	9
2.3.2	Estados limites de utilização .....	10
2.3.2.1	Combinação de ações.....	11
2.3.2.2	Deformação final .....	12
2.3.2.3	Flecha máxima admissível.....	14

2.3.2.4	Vibração.....	16
2.3.3	Verificação pelo método dos coeficientes parciais .....	19
3	INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA.....	23
3.1	ELEMENTOS ESTRUTURAIS E RESPECTIVOS DANOS ESTRUTURAIS.....	23
3.1.1	Pavimentos .....	23
3.1.1.1	Soalho .....	24
3.1.1.2	Vigamento.....	24
3.1.1.2.1	Apoio nas paredes.....	25
3.1.1.2.2	Espaçamento entre vigas .....	26
3.1.1.2.3	Secção das vigas .....	27
3.1.1.3	Tarugos.....	28
3.1.1.3.1	Tarugamento simples.....	28
3.1.1.3.2	Tarugamento de cruzeta .....	29
3.1.1.3.3	Tarugamento entalonado .....	29
	.....	30
3.1.1.4	Cadeias.....	30
3.1.2	Coberturas .....	31
3.1.3	Elementos de Ligação .....	35
3.1.3.1	Ligações Tradicionais .....	36
3.1.3.2	Ligações Mecânicas.....	37
3.1.3.2.1	Pregos.....	37



3.1.3.2.2	Parafusos .....	38
3.1.3.2.3	Cavilha .....	39
3.1.3.2.4	Ligadores Planos ( <i>Connectors</i> ) .....	40
3.1.4	Causas de Danos Estruturais .....	41
3.2	DANOS OBSERVADOS E SUAS CAUSAS .....	42
3.2.1	Defeitos do material .....	43
3.2.1.1	Nós .....	43
3.2.1.2	Fendas .....	44
3.2.1.3	Fio inclinado em relação ao eixo da peça (Fio Diagonal ou Fio Torcido) .....	44
3.2.2	Degradação relacionada com a ação de Agentes Bióticos .....	45
3.2.2.1	Fungos Xilófagos .....	45
3.2.2.2	Insetos de ciclo larvar .....	46
3.2.2.3	Insetos Sociais .....	49
3.2.3	Danos relacionados com a ação de agentes atmosféricos .....	51
3.2.3.1	Radiação solar .....	51
3.2.3.2	Chuva .....	52
3.2.4	Danos relacionados com a deficiente concepção e utilização da estrutura .....	53
3.2.4.1	Concepção/Construção inicial .....	53
3.2.4.2	Intervenções posteriores desadequadas .....	53
4	AVALIAÇÃO DO ESTADO DE CONSERVAÇÃO – ENSAIOS .....	55
4.1	ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS .....	55

4.1.1	Identificação da espécie.....	56
4.1.2	Martelo e Formão .....	56
4.1.3	Higrómetro.....	57
4.1.4	Videoscópio.....	58
4.1.5	Sismógrafo .....	58
4.1.6	Ultra-sons (método de ecos, de ressonância ou de transmissão).....	59
4.1.7	Método das vibrações induzidas .....	62
4.1.7.1	GrindoSonic.....	64
4.1.8	Medição da densidade superficial – Pilodyn .....	66
4.1.9	Resistógrafo .....	69
4.1.10	Ensaaios de Carga .....	74
4.1.11	Outros ensaios não-destrutivos.....	75
4.1.12	Resumo .....	76
4.2	ENSAIOS SEMI-DESTRUTIVOS E DESTRUTIVOS.....	79
4.2.1	Ensaaios em provetes de tamanho real.....	80
4.2.2	Ensaaios em provetes isentos de defeitos.....	81
5	ANÁLISE MECÂNICA E ESTRUTURAL DE UM PAVIMENTO EM MADEIRA. CASO PRÁTICO DE ESTUDO .....	83
5.1	Enquadramento Histórico.....	84
5.2	Descrição Estrutural .....	86
5.3	Inspeção Visual .....	88

5.4	Análise Mecânica .....	89
5.4.1	Higrómetro.....	91
5.4.2	Pilodyn .....	93
5.4.3	Grindosonic.....	95
5.4.4	Ensaio à flexão.....	101
5.4.5	Identificação da espécie de madeira.....	106
5.4.6	Conclusões .....	107
5.5	Análise Estrutural.....	108
5.5.1	Soalho .....	110
5.5.1.1	Flexão Simples .....	111
5.5.1.2	Corte.....	114
5.5.2	Vigas.....	116
5.5.2.1	Flexão Simples .....	117
5.5.2.2	Corte .....	118
5.5.2.3	Instabilidade Lateral-torsional.....	119
5.5.2.4	Deformação .....	122
5.5.2.5	Vibração (Conjunto Soalho/Viga) .....	124
5.5.3	Resumo.....	125
6	CONCLUSÃO.....	127
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	131

## ANEXOS

Anexo I.1.....	147
Anexo I.2.....	149
Anexo II.1.....	159
Anexo II.2.....	167
Anexo II.3.....	171

## ÍNDICE FIGURAS

Figura 1 – Componentes da flecha numa viga simplesmente apoiada (EC5) .....	14
Figura 2 – Valores limites recomendados de $a$ e $b$ , e relação recomendada de $a$ e $b$ . 1) Melhor desempenho; 2) Pior desempenho.....	17
Figura 3 – Soalho em madeira.....	24
Figura 4 – Viga de madeira apoiada directamente na parede (Encastrada) .....	25
Figura 5 – Cachorro embebido na parede dando apoio ao frechal, e este por sua vez, dando apoio à viga (Segurado; 1942) .....	26
Figura 6 – Dimensões médias de alguns tipos de madeira utilizadas em Portugal no início do séc. XX (Dias; 2008) .....	28
Figura 7 – Tarugamento Simples (Ilharco <i>et al.</i> ; 2006).....	29
Figura 8 – Exemplo de um Tarugamento simples .....	29
Figura 9 – Tarugamento de cruzeta executado com ripas de madeira (Dias; 2008) .....	29
Figura 10 - Esquema de tarugamento entalonado (Dias; 2008).....	30
Figura 11 – Cadeias (Segurado; 1942) .....	30
Figura 12 – Esquema de Asna simples (Lopes; 2007) .....	31
Figura 13 – Tipo de asnas (Costa; 2012) .....	32
Figura 14 – Esquema de cobertura plana .....	33
Figura 15 – Esquema de cobertura de uma água.....	33

Figura 16 – Esquema de cobertura de duas águas .....	33
Figura 17 – Esquema de cobertura de três águas .....	33
Figura 18 – Esquema de cobertura de quatro águas .....	33
Figura 19 – Esquema de cobertura cônica .....	33
Figura 20 – Esquema de cobertura piramidal .....	34
Figura 21 – Esquema de cobertura em mansarda .....	34
Figura 22 – Esquema de cobertura poligonal.....	34
Figura 23 – Imagem de cobertura semicircular .....	35
Figura 24 – Imagem de cobertura em cúpula .....	35
Figura 25 – Ligação Tradicional em forma de Encontro Inclinado.....	36
Figura 26 – Ligação Tradicional em forma de Encontro Vertical .....	36
Figura 27 – Ligação Tradicional em forma de Cachorro .....	37
Figura 28 – Ligação Tradicional em forma de Cruzamento .....	37
Figura 29 – Pregos anelares .....	38
Figura 30 – Pregos torcidos.....	38
Figura 31 – Pregos redondos lisos .....	38
Figura 32 – Pregos quadrados .....	38
Figura 33 – Parafuso Corrente .....	39
Figura 34 – Parafuso de porca.....	39
Figura 35 – Ligador do tipo Cavilha .....	40
Figura 36 – Placa dentada tipo <i>Bulldog</i> .....	40

Figura 37 – Chapas <i>Rothoblass</i> .....	40
Figura 38 – Nó num elemento de madeira.....	43
Figura 39 - Fenda numa viga de madeira maciça.....	44
Figura 40 – Presença de fungo de podridão cúbica do tipo <i>Serpulla Lacrymans</i> (Costa <i>et al.</i> ;2007a) .....	46
Figura 41 – <i>Anobium Punctatum de Geer</i> (Caruncho Corrente) (Guimarães <i>et al.</i> ; 2012) .....	47
Figura 42 – <i>Hylotrupes Bajulum L.</i> (Caruncho Grande) (Guimarães <i>et al.</i> ; 2012).....	47
Figura 43 – Exemplo de ataque por insetos xilófagos (Dias; 2008) .....	48
Figura 44 – Presença de ataque de insetos xilófagos no Palácio de Belmonte (Ilharco <i>et al.</i> ; 2007c) .....	48
Figura 45 – Durabilidade de algumas madeiras correntes, de acordo com a EN 350-2 (Cruz; 2012).....	51
Figura 46 – Higrómetro <i>Protimeter</i> .....	57
Figura 47 – Videoscópio <i>Wurth</i> .....	58
Figura 48 – Realização <i>in situ</i> de ensaio com Sismógrafo (Dias; 2008) .....	58
Figura 49 – Ultra-sons PUNDIT (Portable Ultrasonic Non destructive Digital Indicating Teste) .....	60
Figura 50 – Trajetória de ondas ultrassónicas .....	61
Figura 51 – Esquema de funcionamento de um aparelho para o Método das vibrações induzidas.....	63
Figura 52 – <i>Grindsonic</i> MK5 ‘industrial’ .....	64

Figura 53 – Utilização de detector piezoelétrico para captar vibrações (www.grindosonic.com) .....	65
Figura 54 – Indução em vibração da amostra (www.grindosonic.com) .....	65
Figura 55 – Leitura efectura no aparelho <i>Grindosonic</i> (www.grindosonic.com).....	66
Figura 56 – Diagrama do equipamento de ensaio típico ( <i>Grindosonic</i> ) (ASTM E 187601)	66
Figura 57 – Localização dos apoios no ensaio com o Grindosonic .....	66
Figura 58 – <i>Pilodyn</i> ® 6J .....	67
Figura 59 – Visor <i>Pilodyn</i> com escala de profundidade .....	68
Figura 60 – Instrumento de Perfuração Resistógrafo (IML-RESI B) .....	70
Figura 61 – Unidade Eletrónica de um Resistógrafo (IML-RESI B) .....	70
Figura 62 – Níveis de velocidade de perfuração .....	71
Figura 63 – Níveis de velocidade de perfuração a escolher consoante o tipo de madeira ...	71
Figura 64 – Perfil de um Resistógrafo .....	72
Figura 65 – Realização de Ensaio de Carga (Dias; 2008).....	75
Figura 66 – D. Antónia Adelaide Ferreira (1881-1896).....	84
Figura 67 – Tanoaria Ferreira, Sala das Carpintarias (Sogrape, S.A).....	84
Figura 68 – Alvará relativo à Tanoaria Ferreira (Outubro 1969) (Sogrape, S.A) .....	85
Figura 69 – Referência às alterações efetuadas à Tanoaria Ferreira, presentes no alvará (Sogrape, S.A).....	85
Figura 70 – Fotografia geral da sala estudada.....	86
Figura 71 – Planta da sala estudada (distâncias em metros).....	86



Figura 72 – Fotografia da planta da sala estudada (Departamento do Património – Sogrape Vinhos, SA) .....	86
Figura 73 – Vista inferior do pavimento.....	87
Figura 74 – Planta da sala estudada. Localização das Asnas e dos Pilares .....	88
Figura 75 – Localização em planta das amostras extraídas para estudo .....	91
Figura 76 – Localização das amostras P01 a P04 .....	91
Figura 77 – Localização das amostras P05 a P12 .....	91
Figura 78 – Medição de humidade das amostras através do uso do <i>Protimeter Plus</i> .....	92
Figura 79 – Zonas de aplicação do Protimeter para avaliar teor em água .....	92
Figura 80 – Imagem ilustrativa das zonas de aplicação do <i>Pilodyn</i> .....	93
Figura 81 – Relação entre a profundidade de penetração do <i>Pilodyn 6J</i> e a densidade da madeira, para a espécie <i>Pinus Pinaster</i> (Lopes <i>et al.</i> ; 2010) .....	94
Figura 82 – Esquema ilustrativo das zonas de utilizadas no ensaio para determinação do martelo a utilizar .....	96
Figura 83 – Martelo H1.....	96
Figura 84 – Martelo H2.....	96
Figura 85 – Martelo H3.....	96
Figura 86 – Martelo H4.....	96
Figura 87 – Zonas de colocação do detetor piezométrico e zonas de indução da vibração .	97
Figura 88 – Exemplo das variações verificadas nos primeiros 6 modos de vibração de uma laje (Moutinho <i>et al.</i> ; 2010).....	98
Figura 89 – Provete pequeno com a localização dos nós (a $0,224 \times l$ das faces) .....	99

Figura 90 – Zona de colocação do detetor piezométrico e zona de indução da vibração....	99
Figura 91 – Esquema de ensaio à flexão (NP310; 2000).....	101
Figura 92 – Ensaio à flexão.....	101
Figura 93 – Curva força-deformação, na zona da deformação elástica.....	102
Figura 94 – Amostra P02.....	104
Figura 95 – Gráfico Força/Deslocamento da Amostra P02.....	104
Figura 96 – Amostra P03.....	105
Figura 97 – Gráfico Força/Deslocamento da Amostra P03.....	105
Figura 98 – Amostra P05.....	105
Figura 99 – Gráfico Força/Deslocamento do Amostra P05.....	105
Figura 100 – Amostra P08.....	106
Figura 101 – Gráfico Força/Deslocamento da Amostra P08.....	106
Figura 102 – Secções transversais e afastamentos das vigas (Martins; 2010) .....	109
Figura 103 – Esquema da secção de pavimento estudada.....	109
Figura 104 – Esquema estrutural do Soalho.....	110
Figura 105 – Diagrama de Esforços Transversos do Soalho.....	111
Figura 106 – Diagrama dos Momentos Fletores do Soalho.....	111
Figura 107 – Distribuição estatística dos valores de tensões.....	112
Figura 108 – Esquema estrutural das Vigas.....	116
Figura 109 – Diagrama dos Esforços Transversos da Viga.....	116
Figura 110 – Diagrama dos Momentos Fletores da Viga.....	116

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Categoria de projetos de estruturas (EC0).....	5
Quadro 2 – Classe de duração das ações (EC5).....	7
Quadro 3 – Valores de $k_{def}$ (EC5).....	13
Quadro 4 – Valores limites para as flechas de vigas segundo o EC5.....	15
Quadro 5 – Valores de $w_{net,fin}$ especificados no DNA do EC5 (Costa; 2012).....	15
Quadro 6 – Coeficientes parciais de segurança $\gamma_M$ .....	20
Quadro 7 – Valores de $k_{mod}$ (EC5).....	21
Quadro 8 – Quadro resumo das principais características de cada um dos tipos de podridão que degradam estruturas de madeira (Guimarães <i>et al.</i> ; 2012)).....	46
Quadro 9 – Quadro resumo dos principais insetos responsáveis pela degradação de estruturas de madeira .....	48
Quadro 10 – Mecanismo de degradação de uma peça de madeira sujeita ao sol e à chuva	52
Quadro 11 – Critério de escolha da técnica não-destrutiva a utilizar, em função do objetivo de inspeção (Guimarães <i>et al.</i> ; 2012).....	77
Quadro 12 – Resumo dos métodos de ensaio não-destrutivos para inspeção a estruturas de madeira (Adaptação de quadro semelhante apresentado em Júnior; 2006) .....	78
Quadro 14 – Dados iniciais das amostras .....	90
Quadro 15 – Resultado das medições de humidade .....	92

Quadro 16 – Valores médios obtidos com o Pilodyn e respetiva densidade.....	94
Quadro 17 – Resultados obtidos na escolha do martelo a utilizar.....	96
Quadro 18 – Resultados obtidos na análise da amostra P02.....	97
Quadro 19 – Dados iniciais dos provetes isentos de defeitos .....	99
Quadro 20 – Valores médios de frequência (medições M2-P2).....	100
Quadro 21 – Valores médios do Módulo de Elasticidade ( <i>Edyn</i> ) obtidos.....	100
Quadro 22 – Dados iniciais para realização do ensaio à flexão.....	103
Quadro 23 – Resultados obtidos no ensaio à flexão .....	103
Quadro 24 – Resultados finais do módulo de elasticidade e da resistência à flexão.....	104
Quadro 25 – Quadro resumo dos módulos de elasticidade obtidos experimentalmente ...	107
Quadro 26 – Dimensões das vigas .....	109
Quadro 27 – Afastamento entre Vigas.....	109
Quadro 28 – Valores das Tensões resistentes obtidos experiencialmente.....	113
Quadro 29 – Comprimento efetivo definido em proporção do vão, segundo o EC5 .....	120
Quadro 30 – Valores dos Módulos de Elasticidade obtidos experimentalmente.....	120

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Considerações Gerais

Ao longo da evolução da humanidade, a madeira foi sempre um dos materiais mais presentes e utilizados pelo Homem, sendo possível identificar e admirar diversas obras de elevado grau de dificuldade e beleza estética, algumas inclusivé com vários séculos de vida, construídas com recurso a este material que ainda nos dias de hoje causa tantos receios e insegurança aos projetistas.

A madeira é um material que apresenta características que a poderiam colocar como um dos materiais mais utilizado em construções, nomeadamente as excelentes características mecânicas e a sua durabilidade, especialmente se estas estruturas forem alvo de uma cuidada conservação. No entanto, este material também apresenta características que levaram ao seu contínuo desuso ao longo dos tempos, sendo preterida em favor de materiais como o aço e o betão. Isso deve-se à reduzida homogeneidade que a madeira apresenta, à existência de grande variedade de espécies com propriedades muito distintas, à presença de defeitos inerentes à condição de elemento natural e as diversas anomalias e agentes que podem condicionar a capacidade resistente de qualquer peça e consequentemente de toda a estrutura.

Em Portugal, em particular, a madeira foi o principal material de construção utilizado até ao início do século XX, juntamente com a pedra, tendo tido papel de destaque em várias construções históricas do nosso país nomeadamente, as estruturas conhecidas como “Gaiola Pombalina”, que aproveitou ao máximo as características vantajosas da madeira. No entanto, com o surgimento do betão armado e do aço, a madeira começou a ser excluída do mundo da construção civil, perdendo a preponderância que teve durante muitos séculos em vários países. A maior homogeneidade destes, a caracterização experimental e controlo de

qualidade de que eram alvo, juntamente com a quase inexistência de regulamentação relativa ao cálculo de estruturas de madeira, causou o progressivo desuso destas.

Contudo, esta tendência tem-se vindo a inverter nos últimos anos devido à necessidade de Reabilitar, em vez da usual demolição no fim da vida útil dos edifícios, que causava perdas históricas incalculáveis. O desenvolvimento de regulamentações, criação e melhoria de técnicas de restauro juntamente com o aparecimento de novos materiais à base de madeira, como o caso do lamelado colado, permitiu que este material tenha entrado novamente numa espiral ascendente de utilização.

### 1.2 Objetivos

A presente dissertação, intitulada *“Diagnóstico e Avaliação da Segurança de Estruturas de Madeira Existentes”* incide essencialmente nas fases de inspeção e diagnóstico, tendo como principal objetivo o estudo das diversas causas de anomalias frequentes em elementos de madeira assim como as metodologias de diagnóstico a utilizar num processo de avaliação de estruturas de madeira existentes.

Para tal, e graças ao apoio de instituições privadas como a Sogrape Vinhos, S.A., esta dissertação consistirá não só numa vertente bibliográfica de estudo das anomalias e metodologias de inspeção possíveis de aplicar, mas também numa vertente prática onde será analisado um pavimento em madeira, através de diversas metodologias de ensaio não destrutivas (Higrómetro, Pilodyn, Grindosonic) e Ensaio à Flexão realizados sobre provetes provenientes do pavimento em estudo.

A realização desta gama de ensaios experimentais permitirá obter valiosas informações relativas ao estado de degradação dos provetes, fornecendo dados que permitam ao

proprietário do edifício ter conhecimento do estado de conservação do pavimento e ver respondidas as suas questões principais, nomeadamente:

- *Qual o estado de conservação do pavimento?*
- *Qual a sua capacidade resistente?*
- E por fim, *É possível a sua utilização?*

### 1.3 Organização da Dissertação

Esta dissertação encontra-se organizada em 6 capítulos:

No Capítulo 1 faz-se uma breve apresentação do trabalho, sintetização do seu conteúdo e definição dos objetivos propostos.

No Capítulo 2 aborda-se a verificação do comportamento estrutural de elementos em madeira, referindo as regulamentações principais, Eurocódigo 5, e as verificações de segurança necessárias e referenciadas na regulamentação.

No Capítulo 3 descreve-se a fase de inspeção de estruturas de madeira, essencial no processo de diagnóstico, onde são referidos os elementos estruturais mais comuns em madeira, pavimentos e coberturas, assim como a variedade de danos que se pode observar nesses elementos e as suas causas, podendo ser de origem natural, provocadas por agentes bióticos, provocadas por agentes atmosféricos, ou devido a uma deficiente conceção ou uso da estrutura.

No Capítulo 4 descreve-se a fase de diagnóstico de estruturas de madeira, sendo referidas diversas metodologias de ensaio que se podem classificar como metodologias de ensaio não destrutivas e metodologias de ensaio destrutivas. Esta distinção consiste no grau de afetação

que as mesmas provocam na estrutura, nomeadamente, se condicionam a sua capacidade resistente ou não.

No Capítulo 5 apresentar-se-á o levantamento estrutural do edifício em estudo assim como as anomalias detetadas através da inspeção visual da mesma. Será também apresentada a gama de ensaios realizada no pavimento das instalações da Sogrape Vinhos, S.A. A análise a que o pavimento em estudo foi sujeito estará dividida em dois subcapítulos, sendo o primeiro Análise Mecânica, onde serão apresentados os dados relativos à realização dos ensaios não destrutivos e destrutivos e, posteriormente, no subcapítulo Análise Estrutural será efetuada uma caracterização do pavimento, tendo em conta as verificações de segurança definidas no EC5, utilizando os dados obtidos nos ensaios e determinando quais as condições de verificação de segurança mais condicionantes para o pavimento em causa.

Por fim, no Capítulo 6, apresentam-se as principais conclusões obtidas com a realização do trabalho e serão respondidas as principais questões colocadas pelo proprietário do edifício objeto de estudo.



## 2 VERIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL

### 2.1 Conceitos gerais

As bases para o dimensionamento de estruturas e quantificação das ações devem ter em conta alguns conceitos gerais como a vida útil das construções, as classes de serviço e a classe de duração das ações, conceitos esses que permitem a realização de uma abordagem de dimensionamento mais rigorosa e específica.

#### 2.1.1 *Vida útil das construções*

As estruturas podem ser classificadas em cinco categorias consoante o valor indicativo do tempo de vida útil a que esses projetos se destinam, como se pode verificar no quadro seguinte:

Quadro 1 – Categoria de projetos de estruturas (EC0)

Categoria do tempo de vida útil de projeto	Valor indicativo do tempo de vida útil de projeto (anos)	Exemplos
1	10	Estruturas provisórias
2	10 a 25	Componentes estruturais substituíveis (vigas-carril, apoios, etc.)
3	15 a 30	Estruturas agrícolas e semelhantes
4	50	Estruturas de edifícios e outras estruturas correntes
5	100	Estruturas de edifícios monumentais, pontes e outras estruturas de engenharia civil

### 2.1.2 *Classes de serviço (EC5)*

As classes de serviço têm como principal objetivo definir as propriedades dos materiais e permitir o cálculo das deformações, em determinadas condições ambientais. Como tal, as estruturas em madeira devem ser incluídas numa das seguintes classes de serviço:

- Classe de serviço 1 – ambiente interior protegido, caracterizada por um teor de água dos materiais correspondentes ao teor de água de equilíbrio para um ambiente caracterizado por uma temperatura de 20°C e uma humidade relativa do ar ambiente excedendo 65% somente durante algumas semanas por ano (locais cobertos e fechados);
- Classe de serviço 2 – ambiente interior não protegido ou exterior não sujeito à ação direta da água das chuvas e com contactos esporádicos com água líquida. Caracterizada por um teor de água dos materiais correspondentes ao teor de água de equilíbrio para um ambiente caracterizado por uma temperatura de 20°C e uma humidade relativa do ar ambiente excedendo 85% somente durante algumas semanas por ano (locais cobertos e piscinas);
- Classe de serviço 3 – ambiente exterior com contactos frequentes com água da chuva, muitas vezes em períodos longos. Caracterizada por condições climáticas conduzindo a valores de teor de água dos materiais superiores aos que se verificam na classe de serviço 2 (locais ao ar livre).

### 2.1.3 *Classe de duração das ações*

Quadro 2 – Classe de duração das ações (EC5)

Classe de duração das ações	Ordem de grandeza da duração acumulada do valor característico da ação
Permanente	Superior a 10 anos
Longa duração	6 meses a 10 anos
Média duração	1 semana a 6 meses
Curta duração	Inferior a uma semana
Instantânea	

## 2.2 MODELO DE CÁLCULO ESTRUTURAL

Na realização de um projeto que envolve estruturas de madeira é necessário dedicar especial atenção a diversas situações que usualmente se verificam e que condicionam o comportamento da estrutura. No trabalho em edifícios com elementos em madeira, esses cuidados a ter referem-se à variabilidade dimensional que as peças existentes podem apresentar, não apresentando uma secção constante ao longo do comprimento da peça e havendo grande irregularidade no afastamento entre elementos de suporte, como por exemplo as vigas que suportam um soalho. Outro fator muito usual, é a dificuldade de efetuar uma correta caracterização das condições de apoio existentes.

Para além dos aspetos referidos anteriormente, existem também outros relacionados com a solicitação que se verifica nas peças ou com o processo de ligação das mesmas que são de extrema importância e aos quais o projetista tem de dedicar especial atenção e rigor. Relativamente às solicitações existentes, é necessário ter em atenção situações em que essa ocorre num plano perpendicular ao fio ou fazendo ângulos com o fio, pois nesses casos a capacidade resistente das peças sofre um acentuado decréscimo. No caso das ligações entre

duas peças de madeira, visto que existe sempre alguma ductilidade e deformabilidade, não é sempre possível determinar com rigor se se tratam de ligações rígidas ou articuladas.

### 2.3 VERIFICAÇÕES DE SEGURANÇA

A segurança de uma estrutura tem como principal quantificador a probabilidade de rotura da mesma. Como forma de avaliação, o Eurocódigo 5 define as verificações necessárias de efetuar, intitulando-as de estados limites, e que correspondem a “*estados a partir dos quais a estrutura deixa de satisfazer os critérios de projeto relevantes*” (Eurocódigo 0).

Costa (2012) refere que para o dimensionamento com modelos segundo os diferentes estados limite devem ser tidos em conta alguns aspetos, sendo eles:

- Diferenças nas propriedades dos materiais, como por exemplo a resistência e a rigidez;
- O comportamento dos materiais relativamente à duração da carga ou à fluência pode ser diferente;
- A influência das condições climáticas como a temperatura ou as variações de humidade;
- Situações de projeto diferentes, tendo em conta as várias fases de construção que implicam distintas condições de apoio ou ligações.

De seguida, serão abordados os diferentes tipos de estado limite, sendo eles o Estado Limite Último (ELU), onde se verificam danos na estrutura como por exemplo a rotura ou a deformação excessiva, e o Estado Limite de Utilização (ELS), como por exemplo a deformação e a vibração.

### 2.3.1 *Estados limite último*

Este estado limite define critérios de resistência que, quando não respeitados, geralmente origina a perda de vidas humanas. Isto deve-se ao facto de este estado considerar que a simples ocorrência de determinado comportamento corresponde a uma situação limite, independentemente da sua duração.

#### 2.3.1.1 Combinação de ações

A verificação da segurança em relação a estados limite últimos, que não envolvam perda de equilíbrio ou fadiga, consiste em respeitar a seguinte condição:

$$E_d \leq R_d \quad (1)$$

em que,

$E_d$  – Valor de cálculo do esforço atuante;

$R_d$  – Valor de cálculo do esforço resistente.

Para tal, os valores de cálculo das ações atuantes devem ser obtidos segundo combinações de ações que distinguem situações de projeto persistentes, Combinações Fundamentais, e situações de projeto acidentais, Combinações Acidentais.

- Combinações Fundamentais

$$E_d = \gamma_G \times G_k + \gamma_{Q,1} \times Q_{k,1} + \sum_{i>1} (\gamma_{Q,i} \times \Psi_{0,j} \times Q_{k,j}) \quad (2)$$

- Combinações Acidentais

$$E_d = G_k + A_d + \sum_{i \geq 1} (\Psi_{2,i} \times Q_{k,i}) \quad (3)$$

em que:

$G_k$  – Valor característico das ações permanentes;

$Q_{k,1}$  – Valor característico de uma das ações variáveis, tomada como ação base;

$Q_{k,i}$  – Valor característico das outras ações variáveis;

$A_d$  – Valor de cálculo (valor especificado) da ação accidental;

$\gamma_G$  – Coeficiente parcial de segurança relativo às ações permanentes;

$\gamma_Q$  – Coeficiente parcial de segurança relativo às ações variáveis;

$\Psi_0, \Psi_1, \Psi_2$  – Coeficientes de combinação  $\Psi_i$  (EC0).

### 2.3.2 *Estados limites de utilização*

No estado limite de utilização, a ocorrência de determinado comportamento não é considerada imediatamente como sendo uma situação limite, ao contrário do que se verifica no estado limite último, sendo que normalmente o dano associado a este estado limite envolve apenas pequenas perdas económicas e raramente provoca vítimas humanas.

Contudo, a grande maioria dos danos e patologias que se podem observar numa construção são resultado do incumprimento da verificação da segurança a estados limite de utilização, situação que deve ser tida em consideração na fase de projeto de modo a evitar tais

ocorrências, fator que ganha ainda mais importância em elementos de madeira pois devido às suas características, material com rigidez baixa comparativamente à resistência mecânica que possui, é normalmente condicionado por condições de estados limite de utilização, nomeadamente em relação à deformação final e à vibração.

### 2.3.2.1 Combinação de ações

A verificação da segurança em relação a estados limite de utilização consiste em respeitar a seguinte condição:

$$E_d \leq C_d \quad (4)$$

em que,

$E_d$  – Valor de cálculo dos efeitos das ações especificadas no critério de utilização, determinado com base na combinação em causa;

$C_d$  – Valor de cálculo correspondente ao valor limite do critério de utilização.

Para a verificação da segurança aos estados limites de utilização, importa fundamentalmente a duração da ação, sendo por isso definidas as seguintes combinações de ações (Félix; 2010):

Combinação característica (ou rara) – Combinação associada a períodos de muito curta duração que poderá solicitar a estrutura durante apenas algumas horas do seu tempo de vida útil.

$$E_d = G_k + Q_{k,1} + \sum_{i>1} (\Psi_{0,i} \times Q_{k,i}) \quad (5)$$

Combinação frequente – Combinação associada a períodos de curta duração que poderá solicitar a estrutura durante cerca de 5% do seu tempo de vida útil.

$$E_d = G_k + \Psi_1 \times Q_{k,1} + \sum_{i>1} (\Psi_{2,i} \times Q_{k,i}) \quad (6)$$

Combinação quase permanente – Combinação associada a períodos de longa duração que poderá atuar na estrutura durante cerca de metade da sua vida útil.

$$E_d = G_k + \sum_{i>1} (\Psi_{2,i} \times Q_{k,i}) \quad (7)$$

em que:

$G_k$  – Valor característico das ações permanentes;

$Q_{k,1}$  – Valor característico de uma das ações variáveis;

$Q_{k,i}$  – Valor característico das outras ações variáveis;

$\Psi_0, \Psi_1, \Psi_2$  – Coeficientes de combinação  $\Psi_i$  (EC0).

### 2.3.2.2 Deformação final

Devido à sua natureza viscoelástica, a madeira é um material que pode ser bastante afetado por efeitos de deformação, apresentando uma fluência considerável. A conjugação de vários fatores como as condições de teor em água, as condições de humidade relativa e a duração da carga, poderão originar uma deformação final do elemento com valores próximos do dobro,  $k_{def} = 2$ , da flecha instantânea (classe de serviço 3).

De acordo com a metodologia apresentada no EC5, a deformação de um elemento pode ser dividida em deformações instantâneas e deformações finais, sendo que dentro destas, pode ser feita a distinção entre as deformações originadas por ações permanentes e as deformações originadas por ações variáveis.



O cálculo da deformação final,  $u_{fin}$ , é efetuado em função da deformação instantânea,  $u_{ins}$ , sendo esta afetada por um fator  $k_{def}$  que tem em conta o aumento da deformação ao longo do tempo em consequência do efeito combinado da carga e do teor de água.

$$u_{fin} = u_{ins} \times (1 + k_{def}) \quad (8)$$

O EC5 define que o valor de  $k_{def}$ , apresentado no Quadro 3, deverá ser escolhido tendo em conta o tipo de material e a classe de serviço.

Quadro 3 – Valores de  $k_{def}$  (EC5)

Madeira	Norma	Classe de Serviço		
		1	2	3
<b>Maciça</b>	EN 14081-1	0,6	0,8	2
<b>Lamelada colada</b>	EN 14080	0,6	0,8	2
<b>LVL</b>	EN 14374, EN 14279	0,6	0,8	2
<b>Contraplacado</b>	EN 636			
	Parte 1	0,8	—	—
	Parte 2	0,8	1	—
	Parte 3	0,8	1	2,5
<b>OSB</b>	EN 300			
	OSB/2	2,25	—	—
	OSB/3, OSB/4	1,5	2,25	—
<b>Aglomerado de partículas</b>	EN 312			
	Parte 4	2,25	—	—
	Parte 5	2,25	3	—
	Parte 6	1,5	—	—
	Parte 7	1,5	2,25	—
<b>Aglomerado de fibras duro</b>	EN 622-2			
	HB.LA	2,25	—	—
	HB.HLA 1, HB.HLA 2	2,25	3	—
<b>Aglomerado de fibras médio</b>	EN 622-3			
	MBH.LA 1, MBH.LA 2	3	—	—
	MBH.HLS 1, MBH.HLS 2	3	4	—
<b>Aglomerado de fibras, MDF</b>	EN 622-5			
	MDF.LA	2,25	—	—
	MDF.HLS	2,25	3	—

### 2.3.2.3 Flecha máxima admissível

As deformações sofridas por elementos estruturais têm de ser alvo de um rigoroso controlo, existindo diversas limitações a vários níveis, sendo elas exigências funcionais, evitar danos em elementos não estruturais como paredes divisórias, portas, etc., exigências ao nível do uso e aspeto como limitar anomalias visuais e evitar a existência de ondulações no pavimentos, e exigências a nível de equipamentos, de modo a garantir o funcionamento apropriado de instalações elétricas, canalizações, etc..

Para tal, o EC5 identifica os vários componentes existentes na flecha de uma viga, Figura 1, e estipula os valores máximos e condições sob as quais essas flechas devem ser projetadas, limites esses identificados no Quadro 4 e Quadro 5.

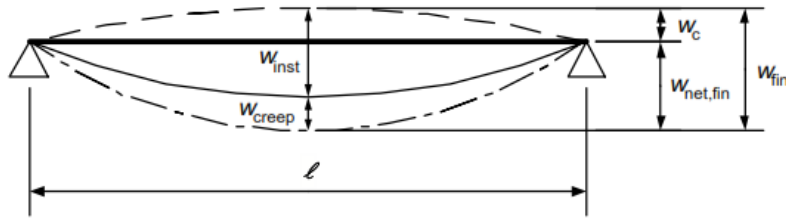


Figura 1 – Componentes da flecha numa viga simplesmente apoiada (EC5)

em que:

$w_{inst}$  – Flecha instantânea devido à combinação de ações;

$w_c$  – Contraflecha aplicada à viga;

$w_{net,fin}$  – Flecha final, sem ter em conta a contraflecha;

$w_{fin}$  – Flecha final

$l$  – Vão da viga

A flecha aparente final, medida em relação à linha reta entre os apoios,  $w_{net,fin}$ , deve ser calculada para a combinação de ações quase-permanente e é dada pela seguinte expressão:

$$w_{net,fin} = w_{inst} + w_{creep} - w_c \quad (9)$$

Logo,  $w_{net,fin} = w_{fin} - w_c \quad (10)$

Quadro 4 – Valores limites para as flechas de vigas segundo o EC5

	$w_{inst}$	$w_{net,fin}$	$w_{fin}$
Viga sobre dois apoios	$l/300$ a $l/500$	$l/250$ a $l/350$	$l/150$ a $l/300$
Viga em consola	$l/150$ a $l/250$	$l/125$ a $l/175$	$l/75$ a $l/150$

Quadro 5 – Valores de  $w_{net,fin}$  especificados no DNA do EC5 (Costa; 2012)

	$w_{net,fin}$	
	Simplesmente apoiada	Consola
Coberturas em geral	$l/200$	$l/100$
Coberturas utilizadas frequentemente por pessoas, para além do pessoal de manutenção	$l/250$	$l/125$
Pavimentos em geral	$l/250$	$l/125$
Pavimentos e coberturas que suportem rebocos ou outros acabamentos frágeis, ou divisórias não flexíveis	$l/250$	$l/125$
Quando $w_{net,fin}$ possa afetar o aspeto do edifício	$l/250$	$l/125$

#### 2.3.2.4 Vibração

A vibração de pavimentos é um fator que influencia as condições de segurança e conforto esperados numa estrutura. Isto pode dever-se a vários fatores como o funcionamento de máquinas, impactos, ruídos e também devido à utilização humana.

Como tal, é necessário controlar as vibrações induzidas em pavimentos e o EC5 fornece-nos intervalos de valores a respeitar e as expressões utilizadas para verificação desses mesmos valores.

A grandeza a analisar é a frequência fundamental de um pavimento de madeira  $f_1$ , que para a situação padrão de um pavimento apoiado em 4 bordos, com dimensões  $l \times b$ , pode ser calculada a partir da seguinte expressão, representativa de uma situação de carga uniformemente distribuída.

$$f_1 = \frac{\pi}{2 * l^2} \times \sqrt{\frac{(EI)_L}{m}} \quad (Hz) \quad (11)$$

em que:

$m$  – Massa por unidade de área, em  $kg/m^2$ ;

$l$  – Vão do pavimento, em  $m$ ;

$(EI)_L$  – Rigidez equivalente de flexão de placa do pavimento segundo um eixo perpendicular à direção das vigas, em  $Nm^2/m$ .

Caso esta frequência fundamental seja inferior a 8 Hz, ( $f_1 < 8$  Hz), (Negrão & Faria; 2009) referem que a ocorrência de ressonância em condições de carga normais é mais provável, sendo necessário portanto efetuar uma investigação mais rigorosa, situação também abordada e descrita no EC5 1-1, secção 7.3.3.

Em pavimentos com frequência fundamental superior a 8 Hz, é necessário satisfazer duas condições, sendo elas:

$$\frac{w}{F} \leq a \quad (mm/kN) \quad (12)$$

$$v \leq b^{(f_1 \times \zeta - 1)} \quad m/(Ns^2) \quad (13)$$

em que:

$w$  – Flecha vertical máxima instantânea causada por uma força vertical estática concentrada,  $F$ , aplicada em qualquer ponto do pavimento, tendo em conta a distribuição das cargas;

$\zeta$  – Coeficiente de amortecimento modal, considerado igual a 1% (ou 0,01) para pavimentos nas situações correntes;

$v$  – Resposta em velocidade a um impulso unitário, em  $m/(Ns^2)$ , ou seja, o valor inicial máximo da velocidade de vibração vertical do pavimento (em  $m/s$ ) causada por um impulso unitário ideal ( $1 Ns$ ) aplicado no ponto do pavimento que fornece uma resposta máxima. Os termos acima de 40 Hz poderão ser desprezados.

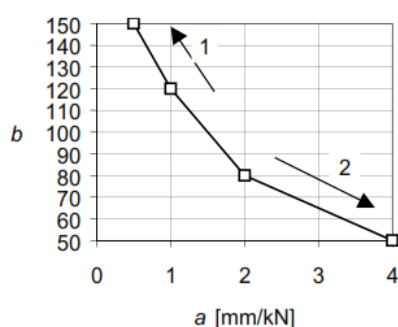


Figura 2 – Valores limites recomendados de  $a$  e  $b$ , e relação recomendada de  $a$  e  $b$ . 1) Melhor desempenho; 2) Pior desempenho

Para um pavimento retangular, com as condições já referenciadas anteriormente, o valor de  $v$  poderá ser obtido, de forma aproximada, pela seguinte expressão:

$$v = \frac{4 \times (0,4 + 0,6 \times n_{40})}{m \times b \times l + 200} \quad (14)$$

em que:

$n_{40}$  – Número de modos de vibração de primeira ordem com frequências próprias até 40 Hz;

$m$  – Massa por unidade de área, em  $kg/m^2$ ;

$b$  – Largura do pavimento, em  $m$ ;

$l$  – Vão do pavimento, em  $m$ .

Sendo que, o valor de  $n_{40}$  poderá ser obtido a partir de:

$$n_{40} = \left\{ \left( \left( \frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \right) \times \left( \frac{b}{l} \right)^4 \times \frac{(EI)_L}{(EI)_b} \right\}^{0,25} \quad (15)$$

em que:

$(EI)_b$  – Rigidez equivalente de flexão de placa do pavimento, em  $Nm^2/m$ , em relação a um eixo paralelo às vigas, em que  $(EI)_b < (EI)_L$ .

Para a realização destes cálculos, deve-se considerar que as ações a que o pavimento está sujeito, para além da força concentrada ou impulso unitário necessários para os cálculos, são somente o peso próprio e as restantes ações permanentes.

### 2.3.3 *Verificação pelo método dos coeficientes parciais*

Na realização de verificações de segurança, os cálculos realizados devem ser afetados por coeficientes que têm por objetivo majorar as ações existentes de modo a garantir que toda a estrutura apresente uma capacidade resistente adequada. Este método de verificação de segurança é conhecido como o método dos coeficientes parciais.

Tal como (Costa; 2012) refere, este método tem um carácter determinístico, ou seja, baseia-se no pressuposto de que todos os parâmetros são constantes, e não estocásticos (aleatórios). Atualmente, este método já é reconhecido e utilizado a nível internacional, e consta das normas europeias, Eurocódigos, sendo que, por exemplo, os coeficientes de segurança relativos a estruturas de madeira (Quadro 6), podem ser encontrados no EC5 1-1 secção 2.4

A metodologia de aplicação consiste num majoramento do valor das ações e posterior comparação com as resistências obtidas por modelos de cálculos, sendo necessário garantir que os valores das ações nunca ultrapassam os valores das resistências e, consequentemente, que nenhum estado limite seja excedido.

Os valores de cálculo,  $X_d$ , resultam do valor característico da propriedade em análise afetado de um coeficiente de segurança.

$$X_d = k_{mod} * \frac{X_k}{\gamma_M} \quad (16)$$

em que:

$X_k$  – Valor característico da propriedade em análise;  $k_{mod}$  – Fator de modificação da resistência que traduz o efeito da duração da carga nas propriedades mecânicas;

$\gamma_M$  – Coeficiente parcial de segurança correspondente ao material em análise.

Relativamente a valores de cálculo de uma propriedade de rigidez de um elemento,  $E_d$  ou  $G_d$ , são calculados da seguinte forma:

$$E_d = \frac{E_{mean}}{\gamma_M} \quad (17)$$

$$G_d = \frac{G_{mean}}{\gamma_M} \quad (18)$$

em que:

$E_d$  – Valor médio do módulo de elasticidade;

$G_d$  – Valor médio do módulo de distorção.

De seguida, são apresentados dois quadros com os valores referentes a  $\gamma_M$  (Quadro 6) e  $k_{mod}$  (Quadro 7), definidos pelo EC5

Quadro 6 – Coeficientes parciais de segurança  $\gamma_M$

Combinações fundamentais	
Madeira maciça	1,3
Madeira lamelada colada	1,25
LVL, Contraplacado, OSB	1,2
Aglomerado de partículas de madeira	1,3
Aglomerado de fibras de madeira duro	1,3
Aglomerado de fibras de madeira médio	1,3
Aglomerado de fibras de madeira de média densidade (MDF)	1,3
Aglomerado de fibras de madeira brando	1,3
Ligações	1,3
Ligadores em placas de metal perfuradas	1,25
Combinações de acidente	1,0



Quadro 7 – Valores de  $k_{mod}$  (EC5)

Madeira	Norma	Classe de Serviço	Duração das ações				
			Permanente	Longa Duração	Média Duração	Curta Duração	Ação Instantânea
Maciça	EN 14081-1	1	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
		2	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
		3	0,5	0,55	0,65	0,7	0,9
Lamelada colada	EN 14080	1	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
		2	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
		3	0,5	0,55	0,65	0,7	0,9
LVL	EN 14374, EN 14279	1	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
		2	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
		3	0,5	0,55	0,65	0,7	0,9
Contraplacado	EN 636						
	Parte 1, Parte 2, Parte 3	1	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
	Parte 2, Parte 3	2	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
	Parte 3	3	0,5	0,55	0,65	0,7	0,9
OSB	EN 300						
	OSB/2	1	0,3	0,45	0,65	0,85	1,1
	OSB/3, OSB/4	1	0,4	0,5	0,7	0,9	1,1
	OSB/3, OSB/4	2	0,3	0,4	0,55	0,7	0,9
Aglomerado de partículas	EN 312						
	Parte 4, Parte 5	1	0,3	0,45	0,65	0,85	1,1
	Parte 5	2	0,2	0,3	0,45	0,6	0,8
	Parte 6, Parte 7	1	0,4	0,5	0,7	0,9	1,1
	Parte 7	2	0,3	0,4	0,55	0,7	0,9
Aglomerado de fibras duro	EN 622-2						
	HB.LA, HB.HLA 1 ou 2	1	0,3	0,45	0,65	0,85	1,1
	HB.HLA 1 ou 2	2	0,2	0,3	0,45	0,6	0,8
Aglomerado de fibras médio	EN 622-3						
	MBH.LA 1 ou 2	1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,1
	MBH.HLS 1 ou 2	1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,1
	MBH.HLS 1 ou 2	2	—	—	—	0,45	0,8
Aglomerado de fibras, MDF	EN 622-5						
	MDF.LA, MDF.HLS	1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,1
	MDF.HLS	2	—	—	—	0,45	0,8



### 3      **INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA**

Os edifícios antigos existentes no nosso país foram edificados com base na construção designada como tradicional, onde eram utilizadas técnicas de construção mais simples diferentes das normalmente vistas nos dias de hoje.

Tanto a nível nacional, como nas edificações antigas da cidade do Porto, os materiais mais empregues ao longo da história foram a pedra e a madeira. Entre estes dois materiais construtivos, a madeira ganha protagonismo como sendo o material mais utilizado na construção de edifícios antigos devido às qualidades que apresenta, tais como, ser o único material com capacidade de funcionar à tração (antes da implementação do ferro nas construções, situação mais recente), a sua trabalhabilidade, facilidade de transporte e a sua abundância no país, fator muito importante nas construções tradicionais.

Comparativamente às alvenarias de pedra, as estruturas de madeira apresentam como vantagens serem mais ligeiras, deformáveis e económicas mas, em contrapartida, apresentam uma combustão relativamente frágil, menor durabilidade e a detração imposta por ações climáticas e consequente ataque causado por agentes biológicos.

#### 3.1    **ELEMENTOS ESTRUTURAIS E RESPECTIVOS DANOS ESTRUTURAIS**

##### 3.1.1    ***Pavimentos***

Os pavimentos de madeira, estruturas horizontais, foram utilizados ao longo de séculos devido a inúmeras especificidades que os tornaram excelentes soluções. A sua constituição baseia-se no soalho e no vigamento, apresentando elementos secundários que fornecem maior segurança às estruturas, tornando o conjunto mais homogéneo. Estes elementos secundários são normalmente designados por tarugos e cadeias, sendo os tarugos utilizados quando o

vigamento é muito comprido de modo a reduzir a secção das vidas dos pavimentos e as cadeiras quando se apresentam obstáculos, de forma a contorná-los mas mantendo a consistência da estrutura.

#### 3.1.1.1 Soalho

Para realização dos pavimentos eram utilizados conjuntos de tábuas, normalmente de pinho (pinho nacional, pinho manso e a casquinha), formando assim o designado soalho (Figura 3). As dimensões dessas tábuas variavam em espessura entre os 2,5 e os 5,0cm, a sua largura entre 12,0 e 30,0cm e comprimentos que podiam alcançar os 10,0m. A execução tradicional do soalho variava conforme o tipo de ligação utilizada: de junta, de chanfro, de meio-fio (à portuguesa) e de macho e fêmea (à inglesa).



Figura 3 – Soalho em madeira

#### 3.1.1.2 Vigamento

Os vigamentos são o elemento de suporte do pavimento através de vigas ou barrotes, disposto com um intervalo muito pequeno entre si e de forma paralela. Este elemento apresenta várias características que podem levar ao incorreto funcionamento da estrutura e

consequente necessidade de intervenções de reabilitação, sendo essas características o apoio nas paredes, o espaçamento entre vigas e a secção das vigas.

#### **3.1.1.2.1 Apoio nas paredes**

As extremidades do vigamento apoiam nas paredes de alvenaria através do simples descarregamento ou através de encastramento (Figura 4). Segundo Teixeira (2004) uma regra que era usualmente aplicada ia no sentido de apoiar a viga em  $2/3$  da espessura da parede, chegando muitas vezes a apoiar-se em toda a sua largura. Estas vigas de madeira eram alvo de especial cuidado quer a nível das suas características, recebendo tratamento especial através de um tratamento à base de tinta de óleo, zarcão ou alcatrão de modo a evitar o seu apodrecimento, quer a nível das ligações através da utilização de ferrolhos, barras de ferro achatadas com furos para pregar ou aparafusar às vigas, para ligar as mesmas às paredes de alvenaria.



Figura 4 – Viga de madeira apoiada directamente na parede (Encastrada)

De forma mais específica, o apoio das vigas nas paredes podia ser executado de três formas, encastradas, apoiadas num frechal ou apoiadas num cachorro, consistindo o apoio de vigas encastradas numa execução em que a extremidade da viga de madeira encaixa em aberturas

existentes nas paredes, devendo ter-se em atenção quando a parede é de alvenaria de pedra irregular, devendo o apoio efetuar-se sobre a pedra com a face superior aparelhada de forma a permitir uma melhor distribuição de esforços na alvenaria de pedra. Relativamente ao apoio num frechal, esta solução era utilizada com maior frequência em construções industriais, de elevado pé direito e em que, segundo Segurado (1942), muitas vezes as vigas assentavam em frechais, corridos e embutidos nas paredes, de modo a permitir uma melhor distribuição de cargas. Apesar desta e de outras vantagens, o apoio sobre frechais apresentava desvantagens significativas como a eventual sobrecarga nas padieiras dos vãos, sendo necessário recorrer ao emprego de cadeias.

A utilização de apoio num cachorro, Figura 5, era a opção escolhida quando o apoio estava destacado da parede, tendo esta solução o inconveniente de provocar cargas excêntricas na parede, visto que as forças verticais são transmitidas fora do núcleo central.

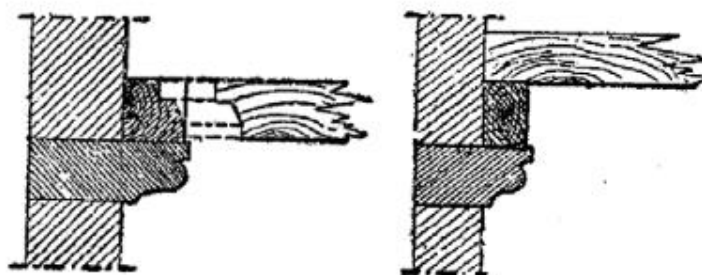


Figura 5 – Cachorro embebido na parede dando apoio ao frechal, e este por sua vez, dando apoio à viga (Segurado; 1942)

#### 3.1.1.2.2 Espaçamento entre vigas

Uma questão fundamental a ter em conta no projeto da estrutura do pavimento é o espaçamento que poderá existir entre as vigas, aspeto importante do dimensionamento e verificação de segurança dessas estruturas. Esta questão, tal como exposta em obras antigas, (Segurado; 1942) e (Costa; 1955), deve ter em conta diversos fatores tais como o vão e a

carga a que as vigas ficam sujeitas mas também o tipo de madeira que é utilizado devido às características próprias de cada espécie que influenciam o cálculo, sendo este último um parâmetro que não era tido em conta antigamente, possivelmente devendo-se ao facto de as madeiras utilizadas na altura serem quase sempre as mesmas, o que proporcionava aos construtores um relativo conhecimento do seu comportamento estrutural expectável (Dias; 2008).

As vigas de madeira, a partir do séc. XIX e com o desenvolvimento da indústria metalúrgica, deixaram de ser uma primeira opção para vão superiores a 7m, caindo mesmo em desuso. A partir dessa altura começou-se a empregar vigas metálicas e pavimentos compósitos como alternativa à solução tradicional de vigas de madeira (Feio; 2005).

#### **3.1.1.2.3 Secção das vigas**

Nas construções em Portugal as vigas em madeira apresentavam dimensões que variavam entre os 0,10 e 0,30m de diâmetro e os 4,0 a 7,0m de comprimento. Nos edifícios construídos até ao início do século XX, os vigamentos consistiam em troncos de madeira aparados ou falqueados. No caso dos falqueados, estes poderiam ser em apenas duas faces ou nas quatro, dependendo da localização da viga em causa, sendo falqueado em duas faces para receber o revestimento dos pavimentos e do teto ou falqueadas nas quatro faces quando eram utilizadas junto a fachadas. Mais recentemente, esta ideia tem vindo a mudar, referindo (Costa; 1955) que “para a boa solidez da construção as vigas devem ser de *quina viva* (com todas as arestas em ângulo reto). Só nas construções ordinárias se admite, por economia, madeira de meia-quadra (com as arestas chanfradas)”. Assim sendo, mais recentemente as vigas de madeiras começaram a apresentar secções quadrangulares sendo, as dimensões

médias de algumas espécies usadas em Portugal no início do séc. XX (Figura 6) as seguintes (Dias; 2008):

<b>Tipo de madeira</b>	<b>Secção média</b>	<b>Comprimento médio</b>
<i>Pitch-pine</i>	0,20mx0,20m a 0,50mx0,50m	4m a 14m
Casquinha	0,25mx0,25m a 0,33mx0,33m	4m a 14m
Carvalho do norte	0,25mx0,25m a 0,50mx0,50m	6 a 10m
Pinho da terra e pinha real	0,25mx0,25m e 0,40mx0,40m	6m a 15m

Figura 6 – Dimensões médias de alguns tipos de madeira utilizadas em Portugal no início do séc. XX (Dias; 2008)

#### 3.1.1.3 Tarugos

São elementos de pequenas dimensões utilizados quando o vigamento é muito comprido e que permite reduzir a secção das vigas dos pavimentos, fazendo assim com que trabalhem em conjunto. Os tarugos aumentam a resistência ao deslocamento lateral do pavimento, evitando uma flexibilização do mesmo e a consequente aparição de vibrações e deformações. De referir ainda, que para que a sua aplicação seja eficaz, os tarugos devem formar entre si uma linha contínua ao longo de todo o vigamento.

Costa (1955) descreve três tipos de tarugamento mais utilizados antigamente sendo eles o tarugamento simples, o tarugamento de cruzeta e o tarugamento entalonado.

##### 3.1.1.3.1 Tarugamento simples

Este tipo de tarugamento consiste na utilização de peças de madeira com comprimento igual ao espaço entre vigas e secções iguais às das vigas de modo a que não sejam causadas instabilidades nas últimas, como se pode verificar na Figura 7 e na Figura 8. A sua fixação é executada através da pregagem de ambas as faces do tarugo na viga.





Figura 7 – Tarugamento Simples (Ilharco *et al.*; 2006)



Figura 8 – Exemplo de um Tarugamento

### 3.1.1.3.2 Tarugamento de cruzeta

O tarugamento de cruzeta caracteriza-se pela utilização de peças com secção fixa de cerca de  $0,05 \times 0,05 \text{ m}^2$  aplicadas de forma cruzada, de modo a aumentar o equilíbrio das vigas, onde encaixam em reentrâncias previamente executadas (Figura 9). A sua fixação é executada através de um prego em cada uma das suas extremidades, formando uma linha em “zigue-zague” (Costa;1955). De referir ainda, que este tipo de execução, apesar de também se usar em Portugal, é mais comum na América do Norte, daí que também seja conhecido como Tarugamento à Americana.



Figura 9 – Tarugamento de cruzeta executado com ripas de madeira (Dias; 2008)

### 3.1.1.3.3 Tarugamento entalonado

Consiste num sistema que obedece a um tipo de samblagem complexo e que para ser executado é necessário que os tarugos tenham as mesmas secções do vigamento. Para a sua

execução é necessário a realização dos seguintes passos: abertura de entalhes nas vigas e posterior medição do comprimento dos tarugos a colocar; realização do entalhe através da divisão da altura da viga em 3 partes iguais, deixando a inferior intacta, abrindo-se uma caixa para o talão de 0,01m de profundidade na parte central e um chanfro entre 0,015 ou 0,020m na parte superior, ligada à caixa do talão; simultaneamente deixa-se nos topos dos tarugos preparados as orelhas e os talões para entrarem nos entalhes das vigas. A colocação dos tarugos é feita com estes comprimidos, de forma a dar ao vigamento uma maior coesão, sendo a sua fixação à viga realizada através de pregos (Figura 10) (Costa; 1955).

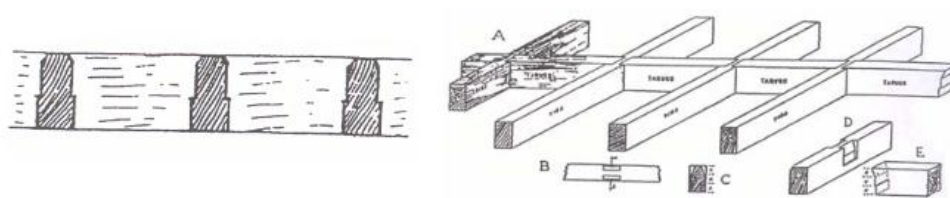


Figura 10 - Esquema de tarugamento entalonado (Dias; 2008)

#### 3.1.1.4 Cadeias

São utilizadas para resolver problemas de descontinuidade obrigatória das vigas, resolvendo essa questão através de vigas perpendiculares e encastradas nas principais, formando assim uma estrutura de contorno ao obstáculos (caixa de escadas, chaminés, etc.) (Figura 11).

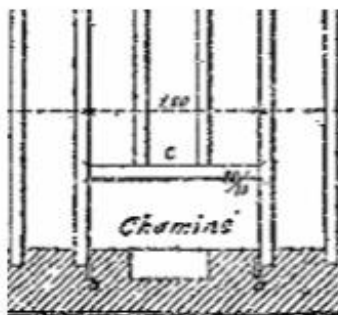


Figura 11 – Cadeias (Segurado; 1942)

### 3.1.2 Coberturas

De modo análogo aos pavimentos, as coberturas dos edifícios antigos são, geralmente, executadas com uma estrutura principal em madeira e concebidas, até há poucas décadas, de forma empírica sendo um exemplo disso, as dimensões padrão utilizadas para as tábuas de guarda-pó, para os vãos e para as ripas.

A estrutura mais simples de uma cobertura é constituída por asnas e travamento. As asnas, estruturas triangulares, são constituídas de forma tradicional por duas pernas que definem a inclinação do telhado, uma linha cuja função é equilibrar esforços verticais provocados pelas pernas, duas escoras e o pendural que se destina a receber os esforços da cumeeira e equilibrar as cargas das escoras (Figura 12). Estas estruturas são capazes de vencer vãos até aos 8 metros e apresentam-se como uma solução bastante interessante pois permitem economizar face a soluções em madeira mais arcaicas. Por sua vez, os elementos que formam o travamento são as madres, a fileira e a diagonal e o frechal, tendo este ultimo como função a amarração e distribuição da carga concentrada da asna.

Relativamente à sua função, pode-se definir uma cobertura de madeira como uma estrutura tridimensional que faz a ligação entre as ripas de apoio da telha e as paredes resistentes ou vigas do edifício. De referir ainda, que para além da conceção espacial da estrutura, é de grande importância a atenção ao detalhe das ligações e à deformabilidade da madeira.

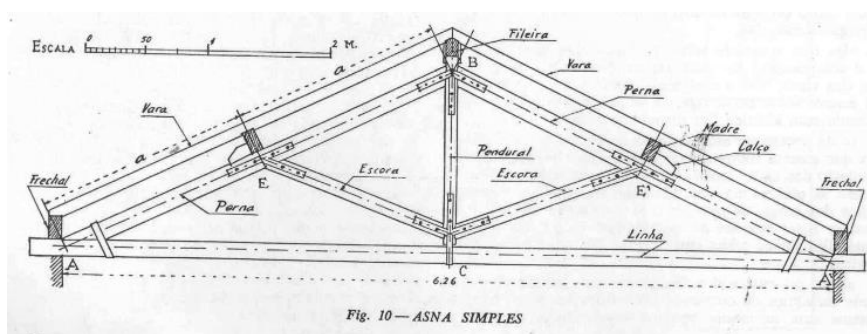


Figura 12 – Esquema de Asna simples (Lopes; 2007)

As coberturas podem ser caracterizadas em dois aspetos principais: Tipificação das Asnas (Figura 13) e Tipificação da Cobertura.

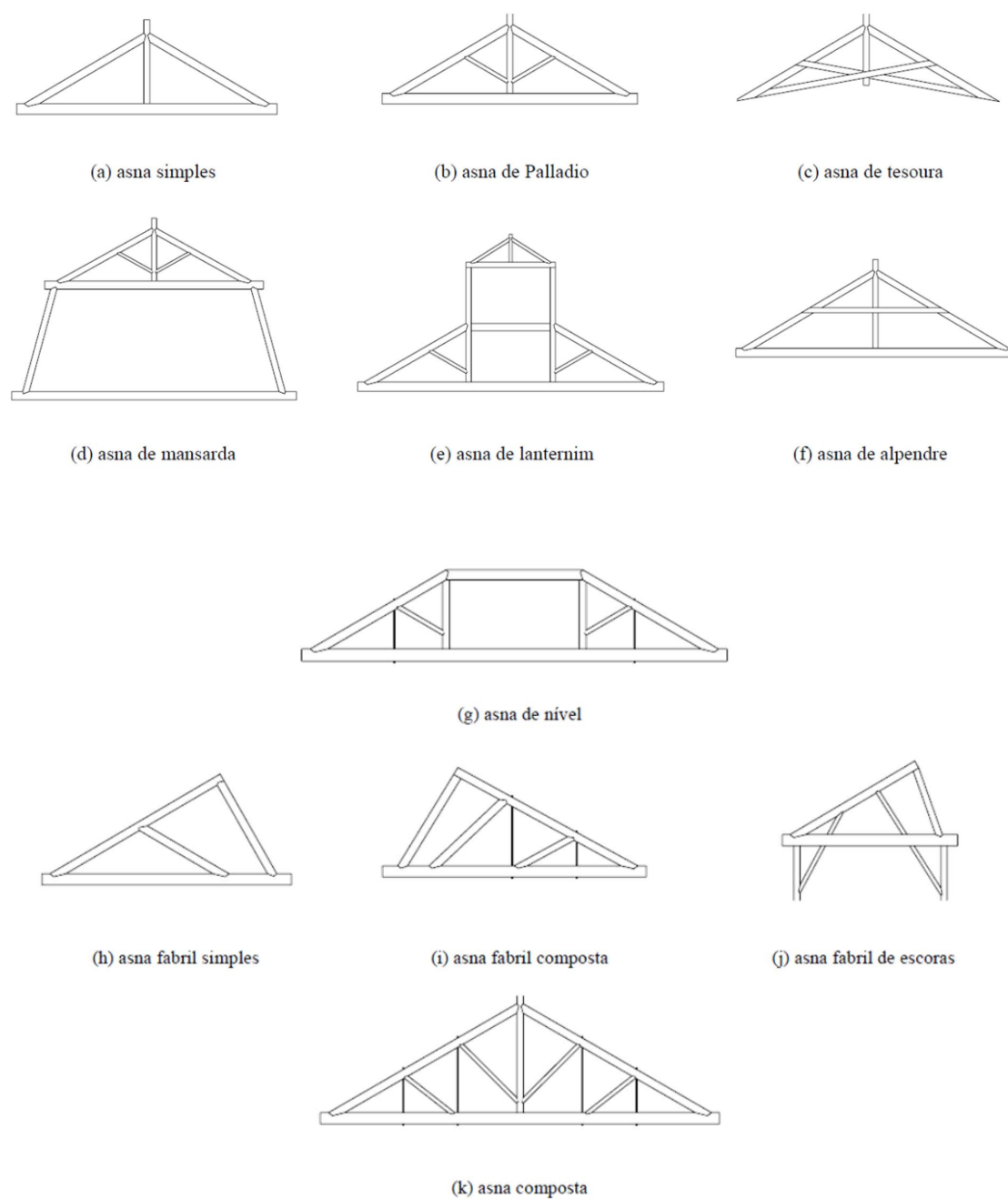


Figura 13 – Tipo de asnas (Costa; 2012)



Figura 14 – Esquema de cobertura plana

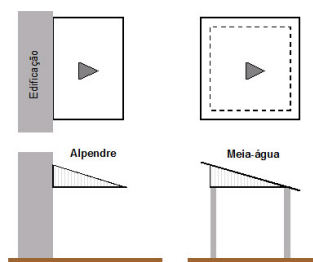


Figura 15 – Esquema de cobertura de uma água

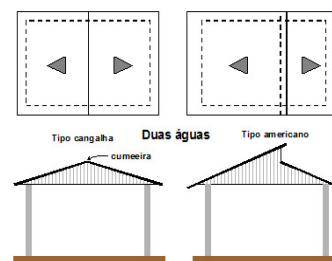


Figura 16 – Esquema de cobertura de duas águas

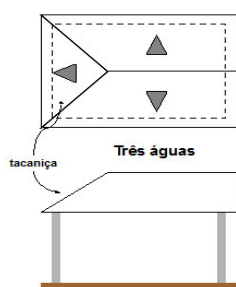


Figura 17 – Esquema de cobertura de três águas

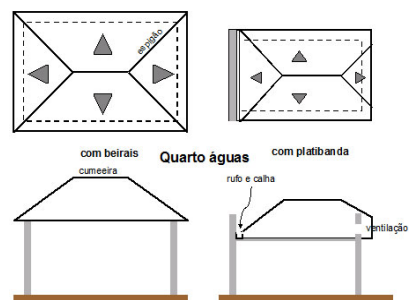


Figura 18 – Esquema de cobertura de quatro águas

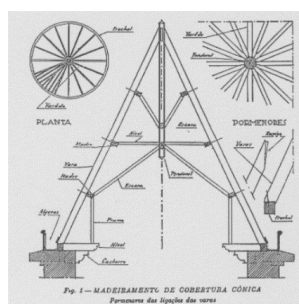


Figura 19 – Esquema de cobertura cônica

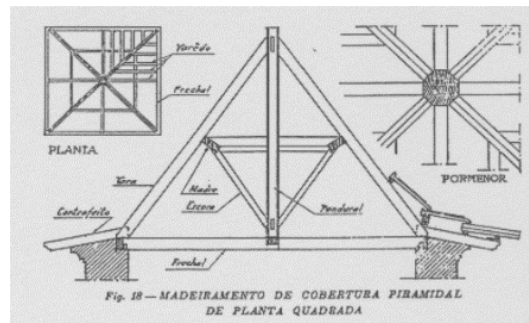


Figura 20 – Esquema de cobertura piramidal

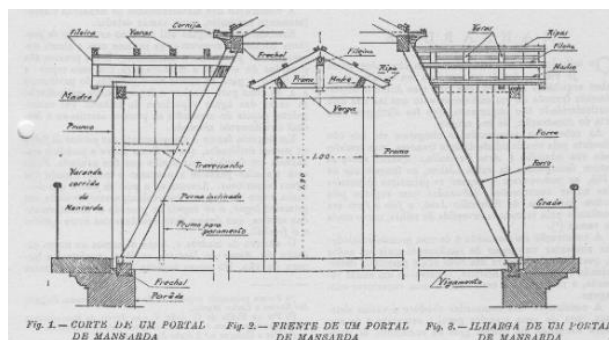


Figura 21 – Esquema de cobertura em mansarda

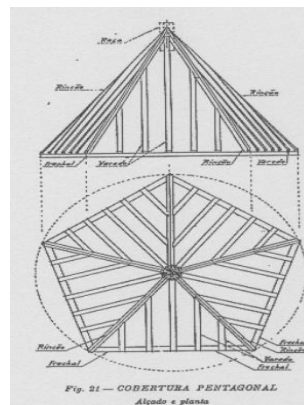


Figura 22 – Esquema de cobertura poligonal



Figura 23 – Imagem de cobertura semicircular



Figura 24 – Imagem de cobertura em cúpula

### 3.1.3 *Elementos de Ligação*

Numa estrutura de madeira, as ligações são usualmente os pontos mais fracos pois são zonas críticas, sujeitas a esforços e tensões localizadas e que exigem especial atenção de modo a não ser colocada em causa a estabilidade da estrutura. De forma a garantir a segurança dessas zonas tem-se vindo a trabalhar em novos elementos ou processos de ligação a utilizar não descurando, no entanto, os métodos tradicionais que, se corretamente calculados e aplicados, continuam a ser uma solução viável.

Podemos então classificar os vários tipos de ligações relativamente ao facto temporal e a tecnologia empregue, tendo assim as ligações tradicionais, ligações de entalhe (madeira sobre madeira) e as ligações modernas ou mecânicas através de ligadores tipo cavilha (*Fasteners*) ou ligadores planos (*Connectors*).

### 3.1.3.1 Ligações Tradicionais

Segundo Dias (2009), as ligações em estruturas antigas de coberturas de madeira são normalmente efetuadas através de entalhes nos elementos estruturais, onde as tensões são transmitidas por compressão e/ou por atrito entre as superfícies em contacto. Estão praticamente limitadas à transmissão de esforços de compressão e de corte, embora a colocação de cavilhas de madeira ou metálicas lhes permita, em alguns casos, acomodar também esforços de tração e mesmo de flexão. Os ligadores metálicos, pregos, parafusos ou chapas, com os quais são usualmente complementadas, têm a finalidade de estabilizar a ligação, principalmente, quando existe a possibilidade de inversão dos esforços, como é o caso de esforços provocados por ação do vento em coberturas.

As ligações tradicionais mais comuns são classificadas em função da forma de encontro e poderão distinguir-se os formatos apresentados nas figuras seguintes.

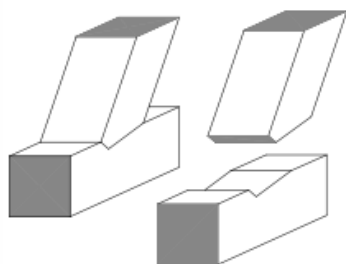


Figura 25 – Ligação Tradicional em forma de Encontro Inclinado

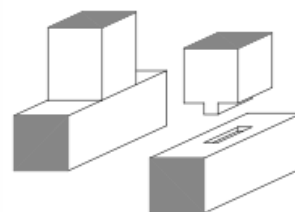


Figura 26 – Ligação Tradicional em forma de Encontro Vertical



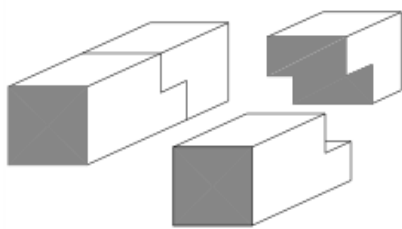


Figura 27 – Ligação Tradicional em forma de Cachorro

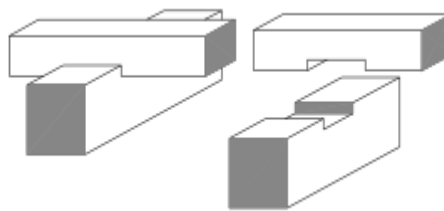


Figura 28 – Ligação Tradicional em forma de Cruzamento

### 3.1.3.2 Ligações Mecânicas

Ao contrário do que sucede nas estruturas com ligações tradicionais por entalhes, em que os elementos de madeira que concorrem na ligação estão no mesmo plano e as tensões entre os elementos são transmitidas essencialmente por contacto entre as respectivas superfícies, nas estruturas mais recentes há uma sobreposição de elementos na zona da ligação e as tensões são transmitidas através de dispositivos mecânicos que atravessem simultaneamente os diversos elementos. Os ligadores mais comuns são pregos, parafusos, ligadores tipo cavilhas e ligadores planos (Dias; 2009).

#### 3.1.3.2.1 Pregos

As ligações com pregos apresentam-se como uma das formas mais simples de efetuar a ligação entre peças de madeira, sendo essa a sua principal vantagem. Os pregos são ligadores vocacionados para resistirem ao corte, apresentando no entanto uma resistência ao arranque que pode ser apreciável, dependendo do tipo de prego utilizado (Figura 29 a Figura 32). Como inconvenientes apresentam-se o facto de ser necessário efetuar uma pré-furação sempre que o diâmetro do prego excede  $1/6$  da espessura a atravessar ou em madeiras duras e a elevada deformabilidade que apresentam, associada ao pequeno diâmetro que

normalmente possuem. Por outro lado, essa deformabilidade apresenta-se vantajosa para resistir a ações sísmicas, uma vez que dá à zona de ligação um comportamento dúctil.

É possível adquirir pregos de variadas formas e dimensões, sendo que também o material empregue no seu fabrico pode ir do aço ao alumínio.



Figura 29 – Pregos anelares

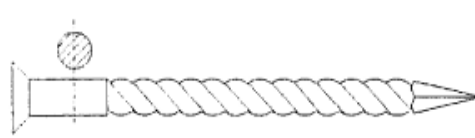


Figura 30 – Pregos torcidos

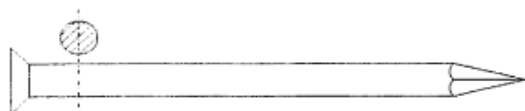


Figura 31 – Pregos redondos lisos



Figura 32 – Pregos quadrados

#### 3.1.3.2.2 Parafusos

Trata-se de um ligador metálico de secção circular, com uma cabeça de diâmetro superior que pode apresentar uma secção sextavada, quadrada ou redonda. Estes ligadores podem ser em aço inoxidável ou aço com tratamento anti corrosão à base de zincagem e apresentam dimensões que podem variar bastante, com o seu diâmetro a variar entre valores de 8 e 20mm e o seu comprimento a chegar a valores de 300mm. Normalmente, a parte lisa da espiga corresponde a 40% do seu comprimento total.

Na introdução deste ligador é necessário ter alguns cuidados, de modo a evitar a fratura da madeira. Para tal deve-se efetuar uma pré-furação e seguidamente enroscar o parafuso à rotação sem percussão, tendo em atenção que o diâmetro da pré-furação deve ser ligeiramente inferior ao do parafuso, de modo a que este mobilize além da resistência ao corte, alguma resistência ao arranque.

Os parafusos mais usuais são os parafusos correntes e os parafusos de porca (Figura 33 e Figura 34). Os parafusos correntes são ligadores metálicos com um corpo roscado que termina numa ponta também roscada e os parafusos de porca têm a função de assegurar que os elementos permaneçam ligados numa eventual ação lateral, sendo por isso utilizados com outros tipos de ligadores (Mendes; 1994). De referir ainda que conjuntamente com o parafuso e a porca, são também utilizadas anilhas em ambos os topos, sendo estas de especial importância para a distribuição da força perpendicular às fibras por uma área adequada, de modo a não haver esmagamento localizado.

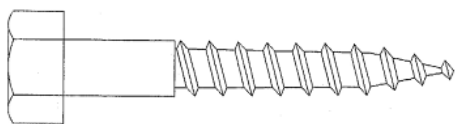


Figura 33 – Parafuso Corrente

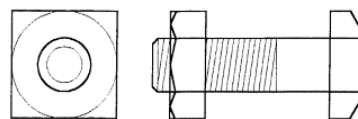


Figura 34 – Parafuso de porca

#### 3.1.3.2.3 Cavilha

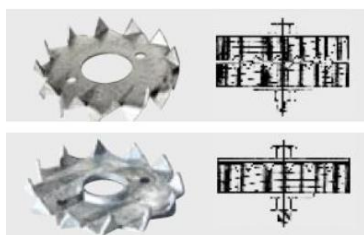
São barras de aço de secção circular que se colocam em furos ajustados, onde o diâmetro do furo é ligeiramente inferior ao da cavilha de forma a estabelecer-se pressão como forma de garantir a sua eficácia na transmissão dos esforços (Figura 35). Desta forma, a montagem destes ligadores apresenta-se como um processo rigoroso, não podendo ocorrer imprecisões pois a eficácia que se espera deste ligador na transmissão de esforços poderia não se verificar. Como tal, aspetos como o teor em água da madeira no momento da execução devem ser controlados com especial atenção, a fim de minimizar os eventuais movimentos provocados pela retração.



Figura 35 – Ligador do tipo Cavilha

#### 3.1.3.2.4 Ligadores Planos (*Connectors*)

Este tipo de ligadores abrange diferentes formas, tais como, anéis abertos ou fechados, placas circulares, placas metálicas dentadas) e chapas de pregar ou estampada (Figura 36 e Figura 37). As chapas estampadas destinam-se a ligar peças alinhadas ou sobrepostas e têm como principal função a transmissão de forças nos nós de asnas pré-fabricadas enquanto os anéis, devido ao seu formato, executam articulações quase perfeitas. Também capazes dessas articulações são as placas dentadas, que apresentam dentes de um só lado ou de ambos, consoante se destinam a realizar ligações entre madeira e um material mais rígido ou madeira-madeira, respetivamente (Costa; 2012).

Figura 36 – Placa dentada tipo *Bulldog*Figura 37 – Chapas *Rothoblass*

### 3.1.4 *Causas de Danos Estruturais*

Após o estudo dos diferentes elementos estruturais existentes em estruturas de madeira, abordados ao longo deste Capítulo 3, é possível efetuar um breve resumo dos danos usualmente verificados em cada um dos mesmos.

Causa de danos mais comuns em pavimentos:

- Apoio insuficiente das vigas
- Tarugamento em falta ou ineficaz
- Remoção de paredes de apoio do pavimento
- Introdução de paredes de compartimentação sobre o pavimento

Causa de danos mais comuns em coberturas:

- Geometria inadequada
- Excentricidade nos apoios
- Madres posicionadas longe dos nós das asnas
- Falta de contraventamento das asnas
- Remoção de elementos no âmbito de intervenções anteriores

Causa de danos mais comuns em ligações:

- Geometria incorreta
- Corrosão acentuada ou rotura dos elementos metálicos de ligação
- Ligações soltas
- Esmagamento ou fendas de madeira na zona afetada pelos ligadores
- Chapas metálicas ou parafusos em falta

- Insuficiente espaçamento e/ou afastamento dos ligadores aos topos e bordos do elemento de madeira
- Anilhas demasiado pequenas
- Afastamento entre elementos que deveriam estar em contacto
- Contacto entre elementos que deveriam estar afastados

#### 3.2 DANOS OBSERVADOS E SUAS CAUSAS

Existem vários fatores que conduzem à deterioração das estruturas em madeira podendo causar danos estruturais. É fundamental para o tratamento e reparação da estrutura, o conhecimento das causas que dão origem às deteriorações pois, sem uma correta inspeção não será possível determinar o tipo de tratamento correto a aplicar.

Os danos que se podem encontrar em estruturas de madeiras dividem-se principalmente em três origens: os danos de origem biótica relacionados com os organismos xilófagos; os danos de origem abiótica, que podem ocorrer devido à exposição a intempéries ou fogo e os problemas de origem estrutural, quer devido a problemas resultantes da construção inicial ou devido a posteriores intervenções no edifício.

Tendo como base as três origens principais anteriormente referidas, serão abordados os seguintes tipos de danos em estruturas de madeira:

- Defeitos do material
- Degradação relacionada com a ação de agentes bióticos
- Danos relacionados com a ação de agentes atmosféricos
- Danos relacionados com deficiente conceção e utilização da estrutura

### 3.2.1 *Defeitos do material*

Estes defeitos influenciam as condições de trabalho, afetando a qualidade do material e consequentemente os valores das suas propriedades mecânicas.

Ao observar elementos estruturais em madeira, é possível identificar vários defeitos e anomalias existentes nas mesmas. Estas irregularidades podem ser desde nós, existência de fendas, o desvio de inclinação do fio em relação ao eixo da peça (fio diagonal ou fio torcido), estes três os mais comuns, até à existência de bolsas de resina, o descaio, a existência de madeira juvenil, etc. (Botelho; 2006). A norma NP180:1962 descreve as anomalias e defeitos mencionados que podem ocorrer na madeira, referindo ainda as suas possíveis causas.

#### 3.2.1.1 Nós

São considerados os defeitos mais condicionantes da resistência global dos elementos, embora muitas das vezes não tenham uma excessiva influência sobre o valor do módulo de elasticidade em flexão. A principal influência desta anomalia verifica-se ao nível da resistência à tração das peças, afetando quase sempre esse valor, ao contrário do que acontece com a resistência à compressão que geralmente, dependendo do tipo de nó, não sofre uma redução.



Figura 38 – Nó num elemento de madeira

#### 3.2.1.2 Fendas

As fendas, como se pode verificar na Figura 39, são anomalias que surgem mais frequentemente nos elementos de grande secção transversal na medida em que, durante o processo de secagem, as retrações são maiores na direção tangencial do que na radial, sendo as longitudinais praticamente desprezáveis (Zoreta; 1986). As fendas podem conduzir à redução do momento de inércia e ter graves repercussões estruturais, principalmente se estiverem localizados em elementos sujeitos a compressão axial ou em zonas de ligação. Apesar de tudo, as consequências resultantes desta fendilhação são de difícil quantificação, considerando (Botelho; 2006) que desde que estas se encontrem dentro de determinados limites dimensionais estabelecidos nas normas de classificação visual, podem ter pouca influência na resistência da peça. Por outro lado, Zoreta (1986) considera as fendas como possivelmente um dos piores danos da madeira, já que uma secagem mal efetuada pode gerar tensões internas na madeira que podem libertar-se bruscamente quando se altera o seu estado de equilíbrio, verificando-se também que um aumento da área exposta devido à presença de fendas de secagem leva a um aumento da suscetibilidade da madeira na ocorrência de fogo.



Figura 39 - Fenda numa viga de madeira maciça

#### 3.2.1.3 Fio inclinado em relação ao eixo da peça (Fio Diagonal ou Fio Torcido)

Este último defeito pode ocorrer naturalmente, derivado da própria natureza morfológica do desenvolvimento da árvore, ou devido a um corte desadequado das peças de madeira e



consiste numa inclinação do fio relativamente ao eixo longitudinal do elemento de madeira. A existência deste defeito torna o elemento mais difícil de utilizar, sendo que as elevadas tensões internas que se instalam na madeira com estas características, podem provocar empenos e fendas na ocorrência de pequenas alterações de humidade, podendo ainda ter implicações graves ao nível da resistência mecânica (Dias; 2008).

### 3.2.2 *Degradação relacionada com a ação de Agentes Bióticos*

Ao longo deste subcapítulo será efetuada uma exposição dos diferentes tipos de organismos que podem afetar as estruturas de madeira. Cada tipo de agente xilófago apresenta diferentes características principais no seu modo de atuação, havendo espécies mais relevantes do que outras. A classificação destes agentes pode efetuar-se em 3 grandes grupos, sendo eles: Fungos xilófagos sendo os mais comuns Fungos de Podridão parda ou cúbica, os Insetos Xilófagos onde os mais usuais são os Anóbios (caruncho) e os Cerambycídeos (caruncho grande) e por fim os Insetos Sociais (térmitas).

#### 3.2.2.1 **Fungos Xilófagos**

O principal responsável pelo aparecimento deste fungo é a presença de teores em água de cerca de 20%, juntamente com condições de ventilação deficientes (Costa et al.;2006). Apesar disso podem ocorrer ataques em elementos secos devido à capacidade de transporte de água dos fungos, conseguindo encaminhar a água de zonas húmidas para zonas secas. As alterações de volume, após a secagem, formam nas zonas atacadas um padrão de fissuração cúbica, superfície essa que se desagrega com elevada facilidade por contacto. Estes eventos implicam danos consideráveis nos elementos de madeira, fazendo com que percam 10 a 20% do seu peso, o que corresponde a uma perda de cerca de 80 a 95% da sua resistência

mecânica, e por norma são detetados apenas quando a madeira já se encontra num estado avançado de degradação, sendo portanto um tipo de podridão perigoso (Dias; 2008).



Figura 40 – Presença de fungo de podridão cúbica do tipo *Serpulla Lacrymans* (Costa *et al.*;2007a)

Quadro 8 – Quadro resumo das principais características de cada um dos tipos de podridão que degradam estruturas de madeira (Guimarães *et al.*; 2012))

Tipo de Fungo	Exemplo/Classe	Breve descrição dos danos	Ação
Fungos Cromogéneos e Bolors	<i>Ceratosmella</i> / <i>Acomicetos</i>	- Coloram a madeira; - Atacam apenas as zonas mais superficiais	Não Destrutiva
Podridão Branca	<i>Cephalosporium</i> / <i>Ascomicetos</i>	- Atacam madeira muito húmida (molhada) e sem ventilação; - Amolece Superficialmente a madeira	Não Destrutiva
Podridão Branca ou Fibrosa	<i>Polystictus Versicolor</i> F./ <i>Basidiomicetos</i>	- Alimentam-se da lenhina; - Madeira desfaz-se em fios sob ação mecânica	Destrutiva
Podridão Castanha ou cúbica	<i>Serpula Lacryman</i> G./ <i>Basidiomicetos</i>	- Alimentam-se de celulose e hemicelulose; - Madeira fica castanha; - Madeira desfaz-se facilmente em pó	Destrutiva

### 3.2.2.2 Insetos de ciclo larvar

Os ataques destes insetos, também denominados de insetos xilófagos, são por norma identificados pelo serrim produzido, que consiste numa mistura de madeira com excrementos

do inseto. Este tipo de ataque biótico é bastante comum e frequente principalmente nas zonas de entrega das vigas dos pavimentos e nas coberturas, como se pode verificar na Figura 43 e na Figura 44. Entre este tipo de insetos podemos identificar como sendo os mais comuns os Anóbios (caruncho) (Figura 41) e os Cerambicídeos (caruncho grande) (Figura 42).



Figura 41 – *Anobium Punctatum* de Geer (Caruncho Corrente) (Guimarães *et al*; 2012)



Figura 42 – *Hylotrupes Bajulum* L. (Caruncho Grande) (Guimarães *et al*; 2012)

Os Anóbios podem alcançar uma profundidade de 3 a 5 mm, sendo os seus orifícios de saída circulares com diâmetro entre os 1 a 1,5mm. Atacam usualmente elementos estruturais em madeira que apresentem um elevado teor em água, sendo frequente por isso que o seu ataque seja acompanhado pelo ataque de fungos de podridão. Os Cerambicídeos atacam também os elementos estruturais em madeira mas com teores de humidade mais baixos (entre os 10 a 14%), sendo mais frequentes os seus ataques em elementos da cobertura. Aspeto a destacar é que esta variedade de insetos xilófagos tem como alvo principal o borne da madeira, tendo uma área de ataque reduzida quando o elemento de madeira apresenta uma grande percentagem de cerne. Estes insetos atingem na fase adulta valores entre os 10 a 20mm de comprimento e os seus orifícios de saída apresentam uma forma elíptica com um diâmetro entre os 4 e os 7 mm.



Figura 43 – Exemplo de ataque por insetos xilófagos (Dias; 2008)



Figura 44 – Presença de ataque de insetos xilófagos no Palácio de Belmonte (Ilharco *et al.*; 2007c)

Quadro 9 – Quadro resumo dos principais insetos responsáveis pela degradação de estruturas de madeira







Imagem	Família	Dimensões Orifício/Agente	Breve caracterização	Necessidade de Humidade
	Cerambycídeos (Cerambycidae) Ex: <i>Hylotrupes</i> <i>Bajulum</i> L. (Caruncho grande)	<b>Orifício</b> Ovoide 4x7mm <b>Agente</b> 10 a 20mm (adulto) Adulto sai para o exterior	- Serrim e excrementos - Faz ruído ao alimentar-se da madeira - Pode escavar galerias de 1cm de diâmetro, de orientação diversa (ataque perigoso)	Sim
	Anóbios (Anobiidae) Ex: <i>Anobium</i> <i>Punctatum</i> de Geer (Caruncho corrente) Insetos de ciclo larvar	<b>Orifício</b> Circular 1 a 1,5mm <b>Agente</b> 2 a 11mm (adulto) Adulto sai para o exterior	- Atacam preferencialmente madeira de mobiliário - Serrim fino e rugoso - A fêmea emite ruídos audíveis, ao chamar o macho	Sim
	Líctidos ( <i>Lyctidae</i> ) Ex: <i>Lyctus Brunneus</i> <i>Steph</i> (Traça) Insetos de ciclo larvar	<b>Orifício</b> Circular 1 a 2mm <b>Agente</b> 3 a 8mm (adulto) Adulto sai para o exterior	- Serrim amarelado muito fino - Bastante comum o ataque a pavimentos de madeira - Sobrevive em ambiente seco	Não

Imagem	Família	Dimensões Orifício/Agente	Breve caracterização	Necessidade de Humidade
	Curculiónidos ( <i>Curculionidae</i> ) Ex: <i>Pselactus Spadix</i> H. (Escaravelho da madeira - Gorgulho)  Insetos de ciclo larvar	<b>Orifício</b> Circular 1 a 2mm <b>Agente</b> 3 a 5mm (adulto) Adulto sai para o exterior	- Serrim semelhante ao dos Anóbios, sendo mais fino e pulverulento - Produzem ataques mais concentrados	>20%
	Bostríchidos ( <i>Bostrichidae</i> ) Ex: <i>Apate Capucina</i> L.  Insetos de ciclo larvar	<b>Orifício</b> Circular 3 a 6mm <b>Agente</b> 4 a 6mm (adulto) Adulto sai para o exterior	- Atacam preferencialmente pavimentos de madeira - Produzem serrim muito fino, de cor creme	Sim
	Térmitas inferiores (6 famílias) Ex: <i>Rhinotermitidae</i> (mais comum em Portugal) Exemplo de inseto: <i>Reticulitermes</i> <i>Lucifugus</i> Rossi (Térmita subterrânea) Insetos Sociais	Proveniente do termiteiro, deslocando-se por galerias	- A secção atacada possui galerias longitudinais de aspeto folhado, não visíveis pelo exterior - Deslocam-se em galerias subterrâneas, pelo interior das alvenarias ou por galerias de terra exteriores - Vivem em ninhos, normalmente no exterior do edifício atacado	Sim

### 3.2.2.3 Insetos Sociais

Os Insetos Sociais, vulgarmente conhecidos como térmitas, necessitam de condições muito especiais para o seu ataque e consequente infestação da madeira. Essas condições consistem numa temperatura elevada, a rondar os 30 graus, e níveis de humidade relativa ambiental muito elevados. Estando presentes estes fatores, as térmitas podem infestar um edifício em toda a sua altura, sendo que estas só afetam edifícios ou partes de edifícios doentes, em que

deficiências diversas da construção permitam a ocorrência e a manutenção de níveis de humidade elevados nos materiais.

Segundo Dias *et al* (2009) a identificação da presença destes insetos pode ser feita pela observação de galerias de terra sobre a madeira ou a alvenaria, resultantes da atividade das colónias, ou pela observação de enxameações de insetos adultos alados, que constituem formas de disseminação das colónias. Podem igualmente, ser reconhecidos pelo aspeto característico de “folhado” da madeira atacada ou ainda pela observação direta dos insetos na sua fase larvar na madeira.

Visto que os ataques destes insetos consistem na abertura de galerias, deixando intactas as secções entre as galerias e a capa exterior, a deteção destes ataques só ocorre num estado já muito avançado, na existência de deformações exageradas ou inclusivamente de rotura do elemento estrutural com consequências que podem ser muito graves (Dias; 2008).

Nome científico	Nome comum	Origem	Massa volúmica	Durabilidade natural				Impregnabilidade		Largura do borne
				Fungos	Hylotrupes	Anobium	Térmitas	Cerne	Borne	
Pinus pinaster	Pinho bravo	S e SW Europa	530-550 <u>540</u>	3-4	S	S	S	3-4	1	g
Pinus sylvestris	Casquinha	Europa	500-540 <u>520</u>	3-4	S	S	S	3-4	1	p-m
Picea abies	Espruce europeu	Europa	440-470 <u>460</u>	4	SH	SH	S	3-4	3v	x
Castanea sativa	Castanho	Europa	540-650 <u>590</u>	2	-	S	M	4	2	p
Quercus robur	Carvalho comum	Europa	670-760 <u>710</u>	2	-	S	M	4	1	p
Quercus rubra	Carvalho americano	América do N	650-790 <u>700</u>	4	-	n/d	S	2-3	1	p

<u>Carunchos</u> [cerne geralm. não-susceptível. S: susceptível (só borne); SH: susceptível (borne e cerne)]
<u>Térmitas</u> [M: cerne medianamente durável; S: cerne susceptível; borne é sempre susceptível]
<u>Fungos</u> [1: muito durável; 5: não-durável; borne é sempre não-durável (5)]
<u>Impregnabilidade</u> [1:facilmente impregnável; 4: não-impregnável]

Figura 45 – Durabilidade de algumas madeiras correntes, de acordo com a EN 350-2 (Cruz; 2012)

### 3.2.3 *Danos relacionados com a ação de agentes atmosféricos*

Os agentes atmosféricos que proporcionam principalmente a degradação da madeira são a radiação solar e a chuva. Isto verifica-se através da conjunção dos efeitos produzidos por cada um desses agentes nos elementos de madeira, originando a ocorrência de ciclos de humificação e secagem, provocando uma variação volumétrica do material. Esta variação provoca tensões internas na peça, resultando deste fenómeno o aparecimento de curvaturas, empenos e fendas (normalmente longitudinais). A existência destas fendas permite maior entrada de humidade na madeira, potenciando o ataque de agentes xilófagos e resultando no envelhecimento da estrutura celular e na diminuição da resistência da peça (Botelho; 2006).

#### 3.2.3.1 *Radiação solar*

O desgaste provocado pelo Sol na madeira ocorre por ação dos raios ultravioleta que degradam a sua camada superficial, verificando-se uma alteração da sua coloração superficial, inicialmente com uma tonalidade amarelada para posteriormente uma tonalidade acinzentada. Este facto deve-se à decomposição da lenhina pela ação dos raios ultravioleta, que afeta uma camada superficial muito reduzida da madeira. A conjugação desta ação com a exposição à água da chuva, faz com que a superfície da madeira seja lavada por escorrimento, dando assim origem aos ciclos de humificação/secagem e fazendo com que a

madeira fique com uma nova camada de madeira sã exposta à radiação, e assim sucessivamente, provocando uma degradação contínua. Estes processos de secagem da madeira por parte das radiações ultravioletas provocam o aparecimento de fendas na madeira, criando assim zonas suscetíveis de alojamento de humidade e consequente ataque biótico.

### 3.2.3.2 Chuva

A água cria condições para a vida da maior parte dos agentes xilófagos e é por esse facto o principal agente indireto de degradação. A ação da água pode ocorrer devido a águas da chuva (precipitação), que ocorrem em coberturas, paredes ou vãos, ou através da ascensão da água por capilaridade através das paredes, ou pelo contacto direto entre os elementos de madeira e o terreno, situação a evitar. A existência de água e a sucessiva alternância entre elemento seco e molhado, juntamente com variações de temperatura, permitem as condições ideais para desenvolvimento de fungos de podridão e ataques de carunchos e térmitas. De referir que o teor em água da madeira é uma parâmetro fundamental, que influencia muito as suas características pois quanto maior o seu valor menor é a resistência mecânica da madeira e maior a suscetibilidade de ser atacada por agentes bióticos (Dias; 2008).

Quadro 10 – Mecanismo de degradação de uma peça de madeira sujeita ao sol e à chuva

Causa	Efeito
Raios Solares	Retração da madeira Madeira Acinzentada (decomposição da lenhina)
Esforços internos	Fendas Longitudinais
Chuva	Água nas Fendas
Inchamento	Aprofundamento das Fendas



Fendas Profundas	Permanência da humidade
Permanência da Humidade	Desenvolvimento fungos/insetos
Ação de fungos/insetos	Deterioração interna
Deterioração pronunciada	Perda de resistência/rotura

### 3.2.4 *Danos relacionados com a deficiente conceção e utilização da estrutura*

#### 3.2.4.1 **Conceção/Construção inicial**

A conceção ou construção inicial incorreta apresentam-se como duas das circunstâncias que originam uma parte significativa dos danos verificados em estruturas de madeira. Situações como incorreto dimensionamento e consequente existência de secções insuficientes para as cargas atuantes, existência de grandes espaçamentos entre vigas, falta de tarugamento entre as vigas do pavimento e a má ligação entre os elementos são, entre outros, alguns dos erros resultantes dessa incorreta conceção inicial.

Dias (2008) refere ainda que devido a irregularidades a nível de projeto, como a não consideração da possibilidade de ocorrência de fenómenos de fluência da madeira, pode implicar a ocorrência de deformações nos elementos das estruturas, a médio/longo prazo.

Estas deficiências podem não trazer problemas imediatos mas levam a uma fragilização progressiva do comportamento da estrutura, diminuindo também a sua durabilidade.

#### 3.2.4.2 **Intervenções posteriores desadequadas**

Ao longo da sua vida, os edifícios são sujeitos a diversas obras ou pequenas alterações, com o intuito de repor a qualidade do mesmo mas que, se não bem ponderadas, podem originar graves danos estruturais ao nível dos elementos como do comportamento global da estrutura. Esses danos devem-se a erros muito graves como a remoção de elementos construtivos

importantes, aumento das cargas atuantes resultantes por exemplo de uma alteração de funcionalidade, introdução de novos materiais sem ser tido em conta os materiais já existentes, o que afeta a rigidez global da estrutura.

Outro dano sério que ocorre através de intervenções posteriores nos edifícios é a humidade de construção, dano esse resultante de pequenas alterações efetuadas nas habitações dos edifícios antigos em madeira como a instalação de redes de água ou esgotos, introdução de pequenas elementos em betão (lajetas de betão armado) sem se proceder à correta impermeabilização dos pavimentos ou a construção de novas instalações sanitárias ou novas cozinhas. Essa acumulação de humidade cria ambientes propícios para ataques de agentes bióticos que, como vimos anteriormente neste capítulo, poderão causar sérios danos nos elementos e consequentemente na estrutura do edifício.

Visto isto, pode-se indicar que a deterioração associada ao deficiente uso e conceção estruturais se resume nas seguintes situações mais frequentes (Guimarães *et al.*; 2012):

- Secção insuficiente associada a um eventual aumento das cargas aplicadas;
- Deformações elevadas devido ao envelhecimento das peças (pequenas roturas, fendas, etc.);
- Rotura das ligações associadas a um dimensionamento errado, a deficiente pormenorização ou a deformações elevadas;
- Deficiente contraventamento;
- Eliminação de apoios verticais por obras de reabilitação mal controladas (muitas vezes os tabiques estruturais antigos têm funções estruturais de apoio vertical e são erradamente eliminados), conduzindo a aumentos significativos de vão ou a perdas de sustentação vertical;

- Degradação das estruturas e em especial dos apoios de vigas e asnas por eliminação e/ou redução da ventilação natural inicial.

## 4 AVALIAÇÃO DO ESTADO DE CONSERVAÇÃO – ENSAIOS

### 4.1 ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS

Hoje em dia, e devido ao desenvolvimento de diversas técnicas ao longo dos últimos anos, já é possível avaliar as características mecânicas de elementos estruturais em madeira através de metodologias não destrutivas, desde a utilização dos dados de caracterizações fornecidos por técnicas tradicionais como classificação visual ou caracterização do teor em água, até ao uso de instrumentos mais complexos como o Resistógrafo ou o *Pilodyn*.

Segundo Machado *et al* (2000), as técnicas não destrutivas são aquelas que “infligindo ou não danos mecânicos aos elementos inspecionados, não condicionam significativamente a sua capacidade resistente”. Este tipo de ensaios fornecem uma avaliação preliminar das características mecânicas dos materiais e podem ser usados para deteção de elementos estruturais ocultos tais como pilares, arcos, estruturas de pisos intermédios; qualificação dos materiais e características das zonas de heterogeneidade dos mesmos; avaliação da extensão dos danos mecânicos em estruturas fissuradas; deteção de vazios e cavidades; avaliação do teor de humidade e altura de ascensão capilar; deteção de degradação superficial e avaliação de algumas propriedades físicas e mecânicas dos materiais.

As técnicas de ensaio não destrutivas (NDT) podem ser divididas em 2 grupos: Métodos Globais de Ensaio (GMT) onde se incluem os Ultra-sons e outros métodos de propagação de ondas e Métodos Locais de Ensaio (LMT) tais como o Resistógrafo e o *Pilodyn*, instrumentos que auxiliam a inspeção visual.

De seguida serão abordadas várias técnicas não destrutivas, sendo feita uma breve descrição dos equipamentos de ensaio e suas metodologias de aplicação.

##### 4.1.1 *Identificação da espécie*

A identificação laboratorial da espécie de madeira consiste na observação de diversos fatores que, quando conjugados, permitem identificar o tipo de madeira. Este ensaio pode ser realizado através da inspeção visual *in situ*, observando-se características como a cor, textura e a diferenciação entre borne e cerne, tal como poderá ser realizado em laboratório, quando através da inspeção *in situ* não é possível definir com rigor a espécie da madeira. Os ensaios laboratoriais consistem na extração de pequenos provetes, com espessuras de cerca de 20µm, que serão analisados à lupa ou através de microscópio. A correta preparação dos provetes deverá permitir a observação da disposição celular da madeira, característica que é intrínseca de cada espécie.

De referir que apesar de ser necessária a extração de provetes para realizar as análises laboratoriais, este ensaio inclui-se nos não-destrutivos visto que na grande maioria das vezes os provetes apresentam dimensões muito reduzidas e como tal não afetam a capacidade resistente do elemento em análise.

##### 4.1.2 *Martelo e Formão*

São instrumentos simples e tradicionais que permitem avaliar de uma forma expedita a existência de danos nos elementos estruturais de madeira. Comparando o som originado pelo embate do martelo numa peça com anomalias e numa sem qualquer tipo de anomalias, é possível detetar a existência de partes degradadas. Relativamente ao formão, a sua utilização permite avaliar a dureza superficial da madeira, o que fornece dados sobre a sua integridade.

Machado *et al* (2000) refere que através da utilização destes elementos, é muito difícil quantificar a extensão da degradação pois a variação da secção ou até das condições de apoio

ou teor em água da madeira podem originar obstáculos à utilização do martelo por exemplo, podendo induzir o utilizador em erro.

#### 4.1.3 *Higrómetro*

O higrómetro permite obter o teor em água da madeira, fator que permite avaliar a possibilidade de ataques de agentes bióticos e que tem essencial importância nos valores característicos da resistência mecânica dos elementos, sendo utilizado de modo a afetar de fatores corretivos os valores da mesma (Figura 46). Se houver uma deficiente impermeabilização das fachadas ou coberturas, isso poderá ser revelado através de um teor em água elevado.

Tal como já referido anteriormente, subcapítulo 3.2.2.1, existe risco de ataque da madeira por parte de fungos quando esta apresenta um teor em água superior a 20%, sendo referido ainda por (Feio *et al.*;2006b) que em casos onde já ocorreram ataques de fungos, esse limite de segurança de 20% estabelecido no EC5, deve ser reduzido para 18%, devendo assim o higrómetro ser utilizado periodicamente para que seja possível atuar preventivamente, eliminando entradas de água e verificar zonas com maior potencial de ataques de fungos.



Figura 46 – Higrómetro *Protimeter*

##### 4.1.4 Videoscópio

Este equipamento permite observar zonas ocultas, não visíveis diretamente, ou de difícil acesso (Figura 47). Uma utilização comum consiste na análise da estrutura dos pavimentos de madeira através da observação de pequenos buracos, aberturas ou falhas nas tábuas do soalho.



Figura 47 – Videoscópio *Wurth*

##### 4.1.5 Sismógrafo

São instrumentos frequentemente utilizados na avaliação de estruturas de edifícios antigos. Os aparelhos, representados na Figura 48, registam as acelerações nas três direções e, através dos registos de acelerações de cada estação, podem ser calculadas as correspondentes densidades espectrais de potência, que fornecem as frequências próprias de vibração da estrutura.

Numa aplicação particular, a leitura das frequências próprias permite estimar a rigidez dos pavimentos, módulo de elasticidade, o que permite elaborar uma avaliação do seu estado de conservação e da eventual necessidade de reabilitação/reforço.



Figura 48 – Realização *in situ* de ensaio com Sismógrafo (Dias; 2008)

#### 4.1.6 *Ultra-sons (método de ecos, de ressonância ou de transmissão)*

Esta técnica de ensaio não destrutivo é uma das mais utilizadas na inspeção de estruturas de madeira e consiste na emissão de um impulso sonoro ou de um impulso ultrassónico num ponto da estrutura. Esse sinal é captado por um recetor, Figura 49, que pode estar posicionado em vários locais, sendo posteriormente analisadas as variações que a onda sofre ao longo do percurso. A correlação entre dados obtidos desses impulsos, nomeadamente a sua velocidade de propagação ( $v$ ) e as propriedades elásticas da madeira, permite estimar o módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{din}$ ) desse elemento de madeira. Para além disso, os Ultra-sons podem ser utilizados para detetar a existência de vazios ou descontinuidades e determinar defeitos locais e variação nas propriedades mecânicas do material.

$$E_{din} = v^2 * \rho \quad (19)$$

em que,

$E_{din}$	corresponde ao módulo de elasticidade dinâmico (kg/m <sup>2</sup> .s)
$v^2$	corresponde à velocidade de propagação da onda ultrassónica (m/s)
$\rho$	corresponde à densidade do elemento (kg/m <sup>3</sup> )

Existem 3 métodos distintos de análise da propagação de ondas sonoras, sendo eles o Método de Ecos, o Método da Ressonância e o Método da Transmissão.

O Método de Ecos analisa a reflexão das ondas ultrassónicas em descontinuidades ou superfícies da peça, sendo normalmente utilizada apenas uma sonda (emissora e recetora). Revela-se pouco eficaz na inspeção de elementos heterogéneos, como é o caso da madeira, dada a grande dispersão das ondas que os atravessam (Júnior, 2006).

O Método da ressonância baseia-se na frequência fundamental de vibração de determinado corpo, sendo provocado um aumento brusco da amplitude de oscilação do mesmo através da ação de um emissor eletrodinâmico de oscilação. Em função desta frequência de ressonância e de fatores como a densidade e dimensões do elemento de madeira é possível determinar o seu módulo de elasticidade, sendo necessário para isso equipamento bastante complexo, só sendo possível a sua utilização em laboratório e não *in situ*.

O Método de transmissão é o método apropriado para a madeira e consiste na propagação de ondas ultrassônicas de baixa frequência, mais baixa do que no método dos ecos, tendo assim maior alcance e maior capacidade para torner os defeitos (Arriaga, 2002). Na presença de defeitos/vazios ocorre um fenómeno de retração das ondas, levando a uma quebra da sua amplitude e aumento do tempo de propagação. Na Figura 50 é possível observar-se a aplicação do método de Ultra-sons e as trajetórias possíveis seguidas pelas ondas ultrassônicas para contornar os obstáculos.

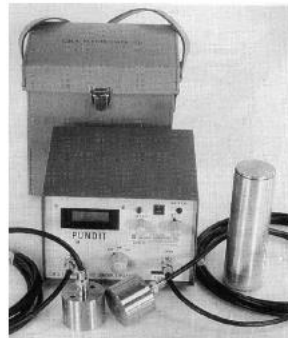


Figura 49 – Ultra-sons PUNDIT (Portable Ultrasonic Non destructive Digital Indicating Teste)



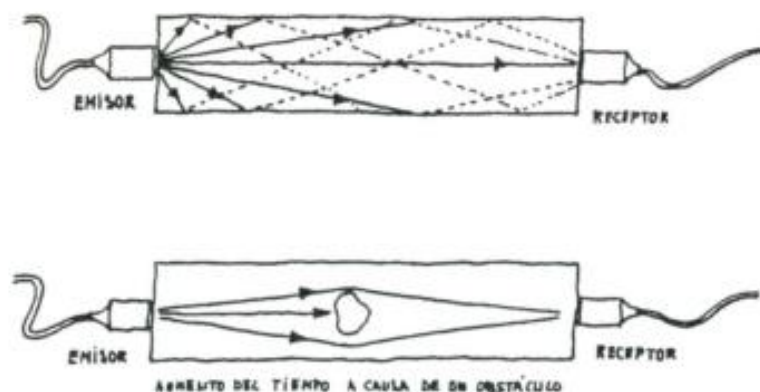


Figura 50 – Trajetória de ondas ultrassônicas

As vantagens de utilização do Ultra-sons são:

- Bom estimador do módulo de elasticidade de elementos de madeira, obtendo-se boas correlações deste parâmetro com o valor da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas no sentido longitudinal, quando utilizado conjuntamente com outras técnicas de inspeção, como a classificação visual, o Resistógrafo, o raios-X, entre outros;
- Possibilidade de obtenção de um perfil de variação das propriedades mecânicas (módulo de elasticidade à flexão) ao longo do comprimento das peças de madeira (Machado; 2003);
- Bastante útil na detecção de defeitos localizados como nós, fendas, vazios e degradações (Machado; 2003);
- Grande facilidade de uso, devido ao seu pequeno porte, peso e simplicidade metodológica do ensaio;
- Adequado para inspeções de estruturas *in situ*, quer pelo exposto nos pontos anteriores, quer por permitir ensaiar peças com apenas uma face acessível e não danificarem o elemento ensaiado;

- Baixo custo, comparando com outras técnicas de inspeção não destrutiva de elementos de madeira.

As desvantagens/limitações do Ultra-sons são:

- Não é um método muito adequado para estimação do valor do módulo de rotura de estruturas de madeira, dado que este pode ser muito condicionado pela existência de defeitos localizados, os quais, por sua vez, podem ter pouco reflexo sobre o valor global da velocidade de propagação de ultra-sons no elemento ensaiado. Porém, no caso de peças limpas de defeitos, a situação é distinta, sendo que este método possui a capacidade de estimar a tensão de rotura à flexão e a massa volúmica com boa precisão (Machado; 2003)
- Necessário o conhecimento da espécie e da massa volúmica do elemento ensaiado. Nos casos em que o técnico não é capaz de obter essas respostas *in situ*, através de inspeção visual, terá de se proceder à extração de provetes para análise laboratorial ou aplicar intervalos de classificação retirados da bibliografia;
- Implica uma metodologia de ensaio cuidada, nomeadamente garantindo a existência em todos os ensaios efetuados das mesmas condições de contacto entre as sondas e a madeira, pois os resultados podem ser influenciados por este facto.

##### 4.1.7 *Método das vibrações induzidas*

Este método baseia-se nos mesmos princípios que a técnica de Ultra-sons, relacionando a velocidade de propagação de uma onda, neste caso provocada por um impacto, com o módulo de elasticidade e a densidade (Figura 51). Também neste método é possível identificar defeitos/vazios uma vez que as ondas de choque se propagam mais rapidamente em madeira

são do que em madeira com dano. Assim sendo, à semelhança do método de Ultra-sons, devido à sua natureza de funcionamento, também o método das vibrações induzidas tem diversas aplicações na inspeção de estruturas tais como a possibilidade de caracterização mecânica, classificação de estruturas, detecção de degradações/vazios e controlo de qualidade das peças (Júnior, 2006).

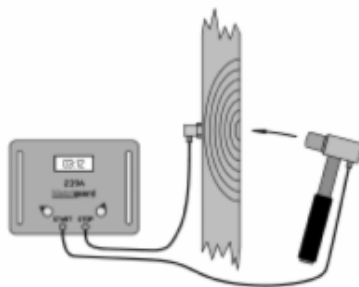


Figura 51 – Esquema de funcionamento de um aparelho para o Método das vibrações induzidas

Este método é, usualmente, utilizado para determinações *in situ*, podendo no entanto a sua metodologia ser aplicada em laboratório, através da análise de provetes de pequenas dimensões. Para este efeito, um dos aparelhos possíveis de utilizar pertence à marca *GrindoSonic* e será abordado de seguida, no subcapítulo 0.

As vantagens de utilização do Método das vibrações induzidas são:

- Facilidade de utilização, sendo que em determinados modelos pode ser manejado por apenas um operador;
- Obtenção de um perfil de variação longitudinal da peça, sendo possível detetar podridões/vazios/defeitos interiores, não visíveis por inspeção visual.

As desvantagens/limitações do Método das vibrações induzidas são:

- Bastante variável com a orientação das fibras (Ross *et al*; 1995);
- Nem sempre é possível aplicar em estruturas de serviço, dada a necessidade de que ambas as faces da peça estejam acessíveis. Para medições longitudinais torna-se difícil a sua aplicação, pois normalmente os topos das vigas não estão acessíveis.

##### 4.1.7.1 GrindoSonic

O sistema *GrindoSonic*, presente na Figura 52, foi concebido para medir as propriedades elásticas de uma vasta gama de materiais. Este aparelho baseia-se na "técnica de excitação por impulso", porque o objeto em teste é sujeito a uma deformação inicial, por meio de um impulso mecânico. Imediatamente, o objeto irá funcionar como um sistema mola-massa e produzir uma vibração mecânica passageira. A frequência desta vibração depende de 3 fatores: a massa do objeto; a sua rigidez, que é determinada pela sua forma e dimensões; e o módulo de elasticidade do material. O equipamento *GrindoSonic* regista esta vibração, faz uma análise no domínio do tempo e mede a frequência natural do modo de vibração dominante de encontro a um oscilador de referência de precisão. Esta técnica de medição é não-destrutiva, de alta precisão e muito simples.

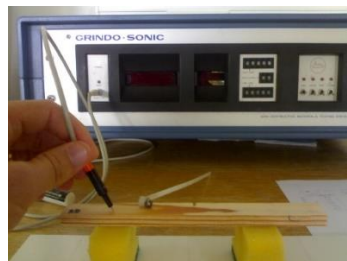


Figura 52 – *Grindsonic* MK5 ‘industrial’

Relativamente ao funcionamento do equipamento, todo o processo é de simples execução estando o aparelho pronto a funcionar assim que for ligado, não sendo necessário efetuar qualquer calibração, ajuste ou aquecimento. A medição em si é executada em apenas alguns segundos, através dos seguintes passos:

- 1) Utilização de um detetor piezoelétrico para captar as vibrações, e convertê-las num sinal elétrico. O ponto do detetor é simplesmente posto em contacto com a amostra.

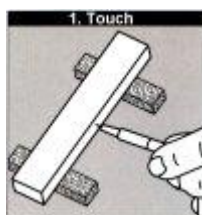


Figura 53 – Utilização de detector piezoelétrico para captar vibrações (www.grindosonic.com)

- 2) Indução em vibração da amostra através de um leve toque. Este processo requer muito pouca energia e é efetuado através da utilização de um pequeno martelo.

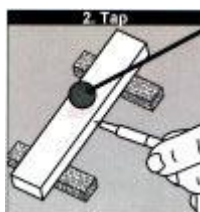


Figura 54 – Indução em vibração da amostra (www.grindosonic.com)

- 3) Quase imediatamente o valor numérico da frequência de vibração é apresentado no painel frontal, permanecendo neste por apenas alguns segundos, após os quais o visor se apaga e o instrumento está pronto a efetuar a próxima medição.



Figura 55 – Leitura efectura no aparelho *Grindosonic* ([www.grindosonic.com](http://www.grindosonic.com))

Todos os procedimentos a efetuar, cuidados a ter e regras a obedecer para a utilização deste aparelho, estão definidas e podem ser consultadas na norma ASTM E 187601 *GRINDOSONIC*.

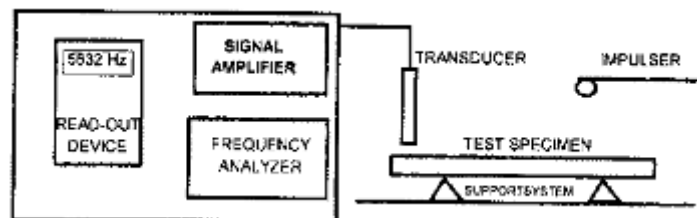


Figura 56 – Diagrama do equipamento de ensaio típico (*Grindosonic*) (ASTM E 187601)

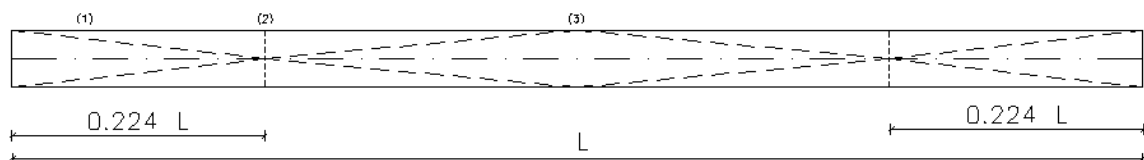


Figura 57 – Localização dos apoios no ensaio com o Grindosonic

#### 4.1.8 Medição da densidade superficial – *Pilodyn*

Instrumento frequentemente utilizado na inspeção de estruturas de madeira, o *Pilodyn* é um equipamento utilizado para estimar a densidade da madeira, efetuando uma relação entre a profundidade de penetração, cujo valor máximo é de 40mm (*Pilodyn* 6J), com a dureza da madeira na direção transversal e, conseqüentemente, com a densidade da madeira ou massa

volúmica através do recurso a estudos existentes, sendo necessário conhecer-se os valores de teor em água e a direção de penetração (Figura 58). Através da relação entre os resultados obtidos da resistência da madeira e a profundidade de penetração, é possível avaliar o estado das peças de madeira, detetando possíveis defeitos existentes mas sendo esta avaliação apenas a nível superficial devido às leituras serem efetuadas a pequenas profundidades.

- **Especificações Técnicas *Pilodyn®* 6J**



Figura 58 – *Pilodyn®* 6J

Força de Perfuração: 6 Joules (Nm)

Profundidade de Perfuração: 0 – 40 mm

Diâmetro de Perfuração: 2.5 mm

Dimensões do Aparelho: Diâmetro (50 mm) x Comprimento (335 mm) x Peso (1.6 Kg)

O funcionamento do *Pilodyn* baseia-se na penetração da zona superficial da madeira por um pino de aço, disparado por uma mola com determinada rigidez. Através de uma pancada seca no topo do equipamento, a mola é libertada e transforma a sua energia potencial elástica numa energia de impacto. Essa energia provoca a penetração por parte da agulha metálica na superfície de madeira, sendo essa profundidade registada na lateral do aparelho, tal como se pode verificar na Figura 59. Esta profundidade só se encontra disponível enquanto o *Pilodyn* continua pressionado.



Figura 59 – Visor *Pilodyn* com escala de profundidade

Na realização dos ensaios com o *Pilodyn* é necessário ter em atenção aspetos como o ângulo de disparo, devendo este ser de  $90^\circ$  entre a direção do aparelho e a tangente ao crescimento dos anéis anuais (Feio; 2005) e a superfície da madeira alvo de estudo, sendo também possível a utilização de outro ângulo desde que o mesmo se repita em todas as medições, uma vez que a deterioração causada por ataque de agentes bióticos terá influência direta nos resultados obtidos, apresentando uma peça degradada maior penetração do que a mesma peça em madeira sã.

O método de ensaio com o *Pilodyn* apresenta-se como um grande apoio ao estudo de elementos de madeira devido às características que apresenta como a sua fácil utilização, facilidade de transporte e leitura dos resultados fácil e rápida.

As vantagens de utilização do *Pilodyn* são:

- Método simples para estimar o estado de conservação superficial e a secção residual de peças de madeira;
- Grande facilidade de utilização.



As desvantagens/limitações do *Pilodyn* são:

- Não garante correlações significativas com a resistência mecânica das madeiras;
- Apenas é capaz de caracterizar o estado superficial da peça, não sendo sensível à existência de defeitos/degradações/vazios no seu interior;
- Pode ser substituído por técnicas tradicionais, de inspeção corrente.

#### 4.1.9 *Resistógrafo*

O Resistógrafo é um instrumento que permite uma análise não destrutiva do estado da madeira em profundidade, através da medição da resistência à perfuração por meio de uma agulha, relacionando-a com a densidade da madeira.

O Resistógrafo é constituído por dois elementos base: o Instrumento perfurador (Figura 60) e a Unidade Eletrónica (Figura 61). O instrumento perfurador consiste num tubo telescópico que contem uma broca/agulha flexível em tungsténio e dois motores elétricos, um para acionamento do avanço da agulha a velocidade constante e outro para garantir a rotação constante da agulha. Por sua vez, a Unidade Eletrónica armazena os dados e fornece esses registos gráficos do ensaio em papel, podendo também esta ser ligada a um computador para transferência dos resultados.

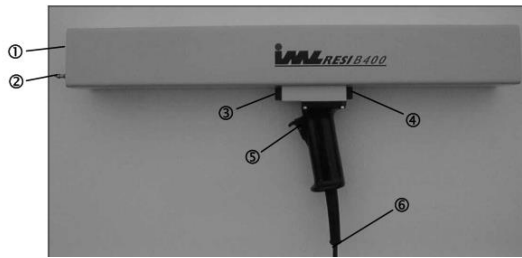


Figura 60 – Instrumento de Perfuração Resistógrafo (IML-RESI B)

- 1 – Agulha de perfuração
- 2 – Pinos de Segurança
- 3 – Interruptor para troca de agulha e para amplificação da amplitude
- 4 – Interruptor para movimento inverso e encaixe para indicação da profundidade de perfuração
- 5 – Interruptor de início com alavanca de bloqueio
- 6 – Cabo de conexão

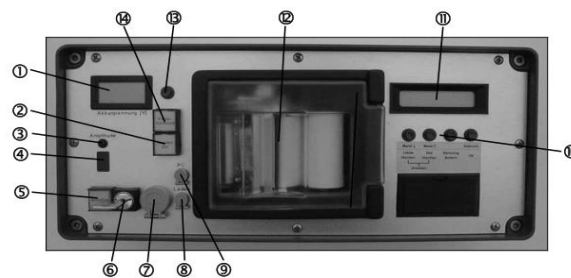


Figura 61 – Unidade Eletrônica de um Resistógrafo (IML-RESI B)

- 1 – Visor de indicação da voltagem da bateria
- 2 – Interruptor para ligar impressora
- 3 – LED indicando aumento da amplitude
- 4 – Visor de indicação do “advanced stage” selecionado
- 5 – Interruptor de seleção do “advanced stage”
- 6 – Interruptor para ligar unidade eletrônica
- 7 – Tomada de conexão para instrumento de perfuração
- 8 – Tomada de conexão para o carregador

- 9 – Tomada de conexão para o cabo de transmissão de dados
- 10 – Interruptor para o funcionamento da memória
- 11 – Visor LC para indicação de informações diversas
- 12 – Impressora
- 13 – Interruptor para indicação da voltagem da bateria
- 14 – Interruptor para alimentação de papel

A agulha possui um diâmetro pequeno (aproximadamente 1,5 mm) e um comprimento variável, dependendo do tipo de resistógrafo bem como do fabricante, podendo o comprimento dos equipamentos da série IML-RESI B variar entre 300 e 1000mm. A resistência à penetração é medida enquanto a agulha roda e vai penetrando no interior da estrutura a uma velocidade constante. O acréscimo de energia consumida pelo aparelho é determinado de forma eletrónica e é tomado como um valor relativo para a medição da dita resistência de penetração. Para a calibração do aparelho é necessário na Unidade Eletrónica definir a velocidade de penetração, *advance speed* (Figura 62 e Figura 63), fator esse que segundo o manual de Resistógrafo da marca IML (IML-RESI B-Series Manual) deverá ser programado tendo em conta os seguintes parâmetros:

Advance stage	Advance speed
1	6 cm/min
2	10 cm/min
3	15 cm/min
4	20 cm/min
5	30 cm/min
6	40 cm/min
7	50 cm/min

Object	Wood species	Usual advance speed
Hard wood	Carpinus, Quercus, Fagus, Acer, Platanus, Castanea, ...	6-30 cm/min
Soft wood	Abies, Pinus, Picea, Tilia, Betula, Aesculus, ...	20-50 cm/min
Structural timbers, poles	Quercus, Picea, Pinus, Abies, Larix, Thuja, ...	10-50 cm/min

Figura 62 – Níveis de velocidade de perfuração

Figura 63 – Níveis de velocidade de perfuração a escolher consoante o tipo de madeira

O perfil fornecido pelo Resistógrafo é um gráfico em papel, como indicado na Figura 64, ou em suporte informático caso se faça uma ligação do equipamento a um computador, em que o eixo das abcissas (xx) indica a profundidade de penetração da agulha, em mm, e o eixo das ordenadas (yy) indica a energia consumida pelo aparelho.

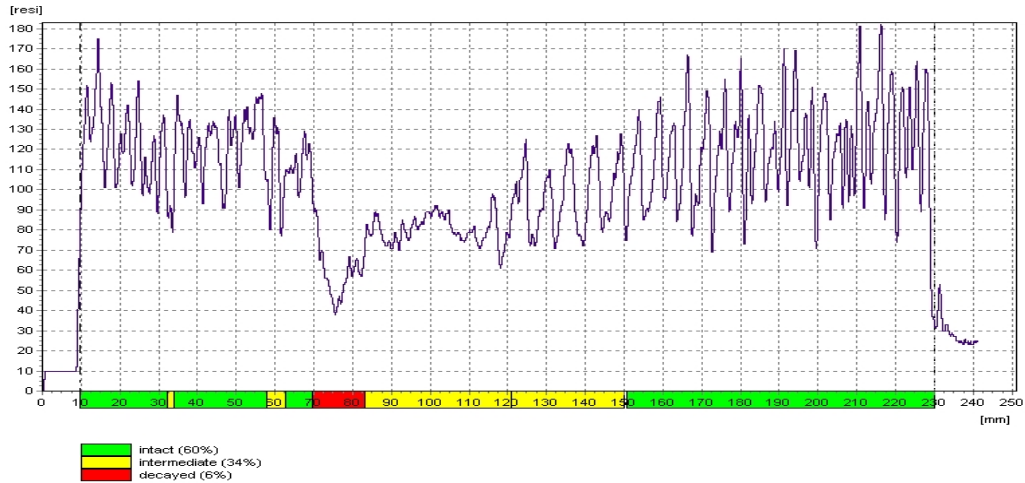


Figura 64 – Perfil de um Resistógrafo

Tal como será abordado no caso prático, no Capítulo 5, os perfis resistográficos permitem obter uma área designada por área resistográfica, correspondente a toda a área situada abaixo da curva do perfil e ainda fornece igualmente os dados numéricos, ou seja, os valores que compõem essa área.

A área pode ser calculada pelo integral de área do perfil resistógrafo total, como se pode observar na seguinte expressão:

$$\int_0^h \text{Perfil resistográfico total} \quad (20)$$

em que,

h: profundidade total de penetração da agulha do Resistógrafo (mm).

A partir da análise dessa área resistográfica poderá verificar-se a existência de zonas em mau estado e defeitos internos tais como, fendas, vazios ou bolsas de degradação biológica e a determinação do perfil de densidade ao longo de elementos de madeira, não deixando de salientar no entanto, que a resistência da madeira ao avanço da perfuração da agulha pode

ser afetada por fatores como ponta da agulha pouco afiada ou desgastada, ângulo de perfuração contra os anéis anuais e alteração da direção do caminho de perfuração devido a alguma descontinuidade interior.

Relativamente aos dados numéricos, estes deverão ser importados para programas de cálculo, *Microsoft Excel* por exemplo, de forma a poder-se efetuar um tratamento estatístico dos dados recolhidos. Um dos métodos mais utilizados consiste na remoção dos valores iniciais e finais (1/6 da amostragem em cada extremidade), chegando assim a um valor médio, designado correntemente por Valor do Resistógrafo (VR) (Botelho; 2006). Isto deve-se ao facto de as zonas superficiais corresponderem a zonas de menor resistência e poderem apresentar degradações, fatores que influenciam os resultados e caracterização da resistência do elemento.

Após a obtenção do Valor do Resistógrafo deverá recorrer-se à bibliografia existente e aos diversos estudos já elaborados anteriormente, (Feio; 2005) (Botelho; 2006), que relacionam este valor com diversas propriedades mecânicas da madeira obtidas através de ensaios laboratoriais, tais como, a massa volúmica ( $\rho$ ), a tensão de rotura à flexão na direção do fio ( $f_m$ ) e o módulo de elasticidade na direção do fio ( $E_0$ ).

De referir ainda que apesar da utilidade da realização deste ensaio, ele deve ser complementado com outros métodos de ensaio não-destrutivos, de forma a poder-se ultrapassar algumas limitações deste método de ensaio, limitações essas que serão referidas mais à frente neste capítulo, e efetuar-se assim uma avaliação quantitativa correta.

As vantagens de utilização do Resistógrafo são:

- Facilidade de utilização, sendo apenas necessário um operador, para determinados modelos e condições de inspeção;

- Possibilidade de se detetarem podridões/vazios/defeitos interiores, não visíveis por inspeção visual;
- Informação de grande interesse, pois fornece um registo desenhado da variação da resistência à perfuração, à escala 1/1, facilmente interpretável mas pontual;
- Possibilidade de avaliar o estado de conservação de elementos estruturais não acessíveis, por exemplo, por estarem encobertos por outros.

As desvantagens/limitações do Resistógrafo são:

- Método que implica algum dispêndio de tempo no tratamento estatístico dos dados, pelo que a sua utilização deverá ser considerada em função da natureza e importância da intervenção a realizar;
- Existem algumas limitações no fundamento do método que poderão induzir em erros, sobretudo quando se pretende deduzir valores quantitativos;
- O técnico deverá ter conhecimento das propriedades da madeira, de forma a ser capaz de analisar corretamente determinados aspetos da saída de dados, como a identificação de anéis de crescimento e zonas de lenhos inicial e final, capacidade de distinção entre medições radiais e tangenciais e identificação de defeitos, entre outros.

##### 4.1.10 *Ensaios de Carga*

Esta metodologia de ensaio *in situ* é utilizada com o intuito de verificar a segurança de estruturas existentes, através da aplicação de uma determinada carga e medição da deformação ocorrida, comparando-a com valores previstos com base em modelos numéricos.

Esta técnica permite estimar o comportamento global da estrutura, uma vez que a influência de fatores de difícil controlo como as condições de apoio (assentamentos e rotações de apoios,

apoios indiretos, comportamento de ligações, etc.) não permitem extrapolar com o necessário rigor os resultados para as propriedades mecânicas dos elementos (Brites; 2011).

A utilização de ensaios de carga, Figura 65, para avaliar o estado de segurança de estruturas existentes, tais como, pavimentos e coberturas, é bastante usual mas apresenta algumas limitações que são necessárias ter em conta, sendo as principais limitações o peso e o custo do equipamento, não sendo por isso possível a sua execução em todas e qualquer estrutura.



Figura 65 – Realização de Ensaio de Carga (Dias; 2008)

#### 4.1.11 *Outros ensaios não-destrutivos*

Para além dos equipamentos de ensaio não-destrutivos referidos ao longo deste capítulo, existem também outros equipamentos e metodologias que são possíveis a aplicar a elementos de madeira sem comprometer a sua integridade e resistência. Podem-se destacar o Georradar, a Detecção acústica de insetos xilófagos, a Radiografia (raios-x e raios gama), a Dendrocronologia, etc., metodologias que fornecem diversas informações sobre os elementos em estudo.

Consoante os dados que se acha relevante analisar, cabe ao investigador considerar e escolher as metodologias a utilizar, por exemplo, a Dendrocronologia fornece com grande precisão, o tempo de vida de um determinado elemento enquanto a Detecção acústica de insetos xilófagos

permite-nos saber a existência de insetos xilófagos, nomeadamente térmitas e cerambicídeos, através da captação e amplificação das ondas sonoras que estes produzem durante a sua atividade.

##### 4.1.12 *Resumo*

Após a caracterização de diversas metodologias de ensaio não-destrutivas é possível efetuar um resumo de toda a informação fornecida. Essa sintetização de informação apresenta-se segundo o critério de escolha da técnica não-destrutiva a utilizar em função do objetivo da inspeção, Quadro 11, e segundo um quadro resumo que apresenta para cada técnica não-destrutiva fatores chave, tais como, medições efetuadas, propriedades possíveis de estimar, meios disponíveis para essa estimativa e as respetivas referências bibliográficas (Quadro 12).



Quadro 11 – Critério de escolha da técnica não-destrutiva a utilizar, em função do objetivo de inspeção (Guimarães *et al.*; 2012)

Objetivo da inspeção	Técnica não destrutiva
Identificação da espécie de madeira	Inspeção Visual Análise Laboratorial
Identificação do tipo de degradação biológica	Inspeção Visual Detecção Acústica
Detecção da extensão de degradação biológica	Meios tradicionais (formão, martelo, etc.) Resistógrafo Raios X/ Raios Y Método das vibrações induzidas Georradar Ultra-sons
Classes de qualidade	Inspeção Visual Ultra-sons Georradar Raios X/ Raios Y
Teor de Humidade	Higrómetro Georradar (de forma indireta)
Detecção de defeitos localizados	Ultra-sons Resistógrafo Raios X/ Raios Y Método das vibrações induzidas
Determinação do Módulo de Elasticidade	Ultra-sons Resistógrafo Método das vibrações induzidas
Determinação da massa volúmica	Resistógrafo
Determinação da densidade superficial	<i>Pilodyn</i>
Datação das madeiras	Dendrocronologia

Quadro 12 – Resumo dos métodos de ensaio não-destrutivos para inspeção a estruturas de madeira (Adaptação de quadro semelhante apresentado em Júnior; 2006)

Técnica não destrutiva	Medição efetuada	Propriedade a estimar	Meios disponíveis	Ref. Bibliográficas
Análise de imagem	Imagem superficial da madeira	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Defeitos</li> <li>• Anéis de crescimento</li> </ul>		Pham e Alcock (1998)
Classificação Visual	Avaliação visual de defeitos e massa volúmica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>E_{m,0}</math>; <math>f_m</math></li> </ul>	Normas de classificação visual	Machado (1994) Glos (1995)
Introdução de esforços mecânicos	Avaliação do $E_{m,0}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>f_m</math></li> </ul>	Normas de classificação mecânica	Bostrom e Holqvist (1999) Glos (1995)
	Avaliação da resistência ao impacto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dureza e <math>f_{c,90}</math></li> </ul>	<i>Pilodyn</i>	Giuriani e Gubana (1993)
	Avaliação da resistência à perfuração	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\rho</math></li> </ul>	Resistógrafo	Rinn (1994) Capuz (2003)
Micro-ondas	Velocidade e atenuação da onda	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teor de água</li> <li>• Detecção de defeitos</li> <li>• Inclinação do fio</li> <li>• <math>\rho</math></li> </ul>	<i>Finnograder</i>	Bostrom (1994) Leicester e Seath (1996)
Propriedades elétricas	Constante elétrica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inclinação do fio</li> </ul>	<i>Model 520 Grain Angle Indicator</i>	Cramer e MacDonald (1989)
Propriedade eletromagnética	Propagação de ondas eletromagnéticas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teor de humidade</li> <li>• Detecção de defeitos/vazios</li> <li>• Constante elétrica</li> </ul>	Georradar GPR	Garcia (1997)
Raios $\gamma$	Absorção de radiação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\rho</math></li> </ul>	<i>Finnograder</i> <i>RDS probe</i>	Bostrom (1994) Madsen (1994)
Raios-X	Absorção de radiação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\rho</math></li> <li>• Detecção de defeitos</li> </ul>	CAT – Portable computer-aided tomographic scanner X-ray Lumber Gauge	Ziegler (1997)
Vibração	Frequência de ressonância	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>E_{m,0}</math></li> </ul>	<i>Metriguard tranverse vibration</i> <i>E-computer</i>	Cai et al. (2000)

## 4.2 ENSAIOS SEMI-DESTRUTIVOS E DESTRUTIVOS

Ao longo deste capítulo tem sido efetuada uma descrição de metodologias de avaliação do estado de conservação de elementos de madeira, recorrendo para isso a técnicas denominadas não-destrutivas, ou seja, que não condicionam a capacidade resistente da estrutura onde são aplicadas. Contudo, esta não é a única metodologia que pode ser aplicada a elementos de madeira com o objetivo de conhecer o seu estado de conservação e efetuar uma caracterização mecânica.

Para tal, é possível recorrer a outra duas metodologias: Ensaaios semi-destrutivos e Ensaaios destrutivos. Ensaaios semi-destrutivos caracterizam-se como o estudo em laboratório de provetes de pequena dimensão e isentos de defeitos, possibilitando assim a obtenção de informações importantes relativas às características mecânicas da madeira. No entanto, esta metodologia implica a remoção desses pequenos provetes, mas devido às suas reduzidas dimensões e desde que se tomem os devidos cuidados (medidas de reparação) das zonas das peças ensaiadas, é possível não tornar a mesma inutilizável. Por outro lado, os Ensaaios destrutivos são metodologias realizadas em laboratório, em provetes de tamanho real, sendo o processo que fornece informações mais rigorosas sobre as características mecânicas e físicas dos elementos estudados, sendo no entanto necessário para isso, a destruição dos elementos estudados. Devido a isso, nem sempre esta metodologia é aplicada, nomeadamente em obras em que o objetivo principal é a reabilitação da estrutura existente.

Para a correta aplicação destes dois tipos de ensaios, existe uma vasta série de normas com o objetivo de padronizar a aplicação dos ensaios e garantir a veracidade dos resultados obtidos.

- Normas de realização de ensaios em provetes de tamanho real com defeitos naturais:  
EN 384 (CEN; 2004e); EN 408 (CEN; 2003b); (EN NP310; 2000).

- Normas de realização de ensaios em provetes de pequena dimensão isentos de defeitos (em Portugal): (NP618; 1973), (NP619; 1973), (NP620; 1973), (NP621; 1973), (NP622; 1973), (NP623; 1973).

##### 4.2.1 *Ensaaios em provetes de tamanho real*

Como é de esperar, o comportamento mecânico da madeira é diferente consoante é obtido através de ensaios em provetes de tamanho real e com defeitos naturais ou através de ensaios em provetes de pequenas dimensões e isentos de defeitos.

Como é usual com elementos de origem natural, estes apresentam na sua constituição pequenos defeitos ou imperfeições, algo que se verifica consequentemente na madeira, e que já foi abordado anteriormente no Capítulo 3.2.1, com são exemplo os nós, as fendas de secagem ou o descaio. Em situações em que é possível estudar estes elementos com dimensões reais, nomeadamente elementos que são para posterior demolição, é possível recolher informações vitais sobre o verdadeiro comportamento em situações reais, e todas as limitações criadas pela presença dessas imperfeições e permite a obtenção de resultados que poderão servir de base para o estudo futuro de estruturas a serem alvo de reparação.

De modo a que os resultados obtidos sejam de possível consideração e utilização futura, é necessário realizar estes ensaios de acordo com as seguintes normas europeias e norma portuguesa, para a determinação das propriedades mecânicas de peças de madeira (Dias; 2008):

- EN 384 (CEN; 2004E) “Structural timber – Determination of characteristic values of mechanical properties and density”. *“Esta norma define o procedimento para a determinação dos valores característicos das propriedades mecânicas e da densidade para uma determinada população de madeira e inclui relações que permitem reduzir*

*os valores característicos de algumas propriedades mecânicas a partir dos valores característicos da resistência à flexão densidade e módulo de elasticidade”;*

- EN 408 (CEN; 2003b) “Timber Structures. Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties”. *“Esta norma especifica métodos de ensaio para a determinação das propriedades mecânicas de peças estruturais de madeira maciça ou lamelada colada: o Módulo de elasticidade em flexão; Módulo de distorção; Resistência à flexão; Módulo de elasticidade em tração paralela ao fio; Resistência à tração paralela ao fio; Módulo de elasticidade em compressão paralela ao fio; Resistência à compressão paralela ao fio; Módulo de elasticidade em tração perpendicular ao fio; Resistência à tração perpendicular ao fio; módulo de elasticidade em compressão perpendicular ao fio; Resistência à compressão perpendicular ao fio; Resistência ao corte. Descreve ainda o modo de determinação das dimensões, do teor em água e da massa volúmica das peças de ensaio”;*
- (NP310; 2000) – “Placas de derivados de madeira. Determinação do módulo de elasticidade em flexão e da resistência à flexão” – *“Esta norma especifica um método de determinação do módulo de elasticidade aparente em flexão axial e da resistência à flexão das placas de derivados de madeira que têm uma espessura nominal igual ou superior a 3mm”.*

#### 4.2.2 ***Ensaaios em provetes isentos de defeitos***

A realização desta metodologia de ensaio permite obter resultados de maior precisão sobre estruturas existentes, devido aos provetes serem removidos do elemento a estudar. É assim possível, em laboratório, efetuar diversos estudos às características do elemento, não esquecendo no entanto que esses valores não correspondem diretamente ao que se passa na

estrutura propriamente dita, tendo que ser afetados por um conjunto de correções, ou coeficientes de segurança, que permitam ter em conta fatores condicionantes como o tamanho real da peça ou a existência de defeitos. Apesar disso, as normas portuguesas não definem a aplicação desses fatores corretivos. (Alvarez *et al.*; 2000) aborda esta questão na sua bibliografia, indicando que na época de maior utilização destes ensaios, até há 40 anos, apesar de ainda ser utilizada nos dias de hoje, eram aplicados alguns fatores corretivos aos resultados obtidos tendo em conta o teor em água da madeira, as dimensões da peça, a qualidade da madeira, entre outros aspetos.

Tal como no caso dos ensaios em provetes de tamanho real, também neste ponto é necessário o seguimento de regulamentação, nomeadamente portuguesa, de forma a garantir a coerência dos resultados obtidos, de acordo com Dias (2008) temos:

- (EN NP618; 1973) – Ensaio de compressão axial;
- (EN NP619; 1973) – Ensaio de flexão estática;
- (EN NP620; 1973) – Ensaio de flexão dinâmica;
- (EN NP621; 1973) – Ensaio de tração transversal;
- (EN NP622; 1973) – Ensaio de fendimento;
- (EN NP623; 1973) – Ensaio de corte;

## 5 ANÁLISE MECÂNICA E ESTRUTURAL DE UM PAVIMENTO EM MADEIRA. CASO PRÁTICO DE ESTUDO

No presente capítulo efetua-se uma análise de um pavimento em madeira localizado na Tanoaria Ferreira, em Vila Nova de Gaia, cujo objetivo é avaliar o estado de degradação do pavimento, obter informações sobre as suas propriedades físicas e mecânicas e avaliar a sua capacidade resistente. Para tal foram efetuados uma série de ensaios, quer não destrutivos quer destrutivos sendo que, devido ao facto de o pavimento já não se encontrar acessível ao público, foi possível a recolha de algumas amostras do pavimento e a sua análise recorrendo a metodologias de ensaio destrutivas. Todos os ensaios foram realizados no laboratório DE Física das Construções e o laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Foram aplicadas diversas metodologias de ensaios não destrutivos como o Higrómetro, o *Pilodyn* e o *Grindosonic*, e posteriormente as amostras de soalho foram ensaiadas à flexão até à rotura.

Estes ensaios foram realizados tanto em amostras recolhidas no local, tábuas de soalho, como em provetes de pequenas dimensões extraídos das amostras referidas. A realização destes ensaios permitiu determinar propriedades físico-mecânicas da madeira tais como, a massa volúmica, o módulo de elasticidade na direção do fio e a tensão de rotura à flexão na direção do fio. Por fim realizou-se a identificação da espécie através da inspeção visual dos provetes removidos.

Com os resultados obtidos dos ensaios laboratoriais, será efetuada uma avaliação da segurança do pavimento tendo em consideração as disposições que o EC5 define como sendo necessárias de garantir num pavimento em madeira.

### 5.1 Enquadramento Histórico

O edifício em estudo, Tanoaria Ferreira, situa-se na freguesia de Santa Marinha, em Vila Nova de Gaia. Este edifício faz parte de um aglomerado de armazéns, armazém Grandes e armazém das Azenhas interligados entre si, e que pertencem ao grupo Sogrape Vinhos, SA. A sala estudada em particular encontra-se no canto noroeste da Tanoaria Ferreira e serviu em tempos de localização a uma oficina de carpintarias (Figura 67).

Estas instalações eram originalmente do grupo A.A. Ferreira, que foi comprado pelo grupo Sogrape em 1987. O antigo proprietário, D. Antónia Adelaide Ferreira (1811-1896), carinhosamente conhecida como “Ferreirinha” (Figura 66), teve um papel fundamental e proeminente da história do Vinho do Porto. “Uma mulher lendária com uma personalidade única, que se tornou um mito e um símbolo de força, enfrentando as adversidades do Douro no séc. XX”, é uma das várias referências a D. Antónia A. Ferreira que se pode verificar na página oficial da Sogrape. Graças à sua dedicação e coragem, conseguiu fortalecer e aumentar o seu património na região do Douro vinhateiro assim como na região de Vila Nova de Gaia.



Figura 66 – D. Antónia Adelaide Ferreira (1811-1896)



Figura 67 – Tanoaria Ferreira, Sala das Carpintarias (Sogrape, S.A)



Relativamente à Tanoaria Ferreira, não foi possível encontrar dados concretos sobre a data de construção mas, graças aos elementos fornecidos pelo Departamento do Património da Sogrape Vinhos SA., conseguiu-se obter algumas informações importantes para a caracterização do edifício. Foi possível enquadrar a altura de construção do edifício em inícios do séc. XIX, encontrando-se inclusivé uma referência à Tanoaria que remonta ao ano de 1816 nomeadamente, um inventário de materiais. Existem ainda dados sobre um incêndio ocorrido nas instalações, algures entre a década de 50 e 70 do século XX, que causou danos significativos. Por último, obteve-se informações sobre algumas alterações efetuadas após esse incêndio, referidas num alvará elaborado no ano de 1969 (Figura 68 e Figura 69).

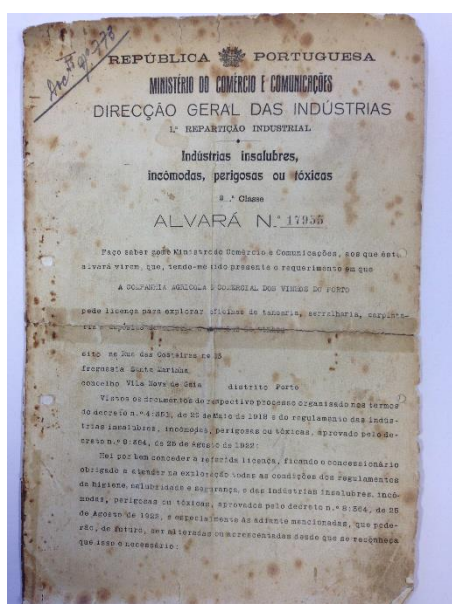


Figura 68 – Alvará relativo à Tanoaria Ferreira (Outubro 1969) (Sogrape, S.A)

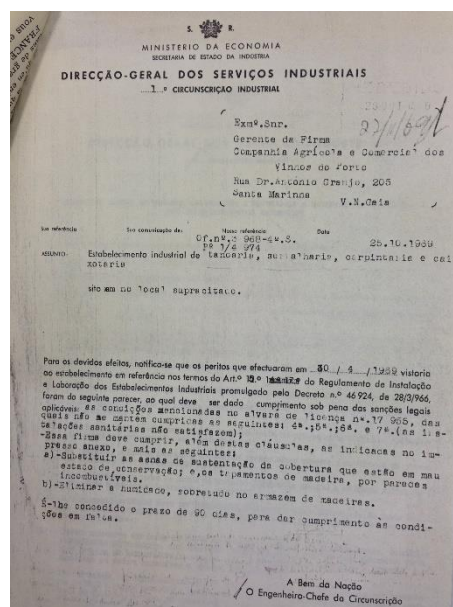


Figura 69 – Referência às alterações efetuadas à Tanoaria Ferreira, presentes no alvará (Sogrape, S.A)

Atualmente, as instalações da Tanoaria Ferreira ainda se encontram em funcionamento sendo que algumas salas foram desativadas, como é o caso da sala das carpintarias, onde foram realizados os estudos referidos no Capítulo 5 desta dissertação, que já não se encontra acessível ao público, tendo sido vedado o seu acesso como medida de segurança e proteção.

## 5.2 Descrição Estrutural

A sala estudada, Figura 70, situa-se no canto noroeste do piso 2 do edifício da Tanoaria Ferreira e apresenta paredes exteriores em alvenaria de pedra com cerca de 0,50 metros de largura, sendo que estas paredes prolongam-se até ao piso -1. A sua planta arquitetónica pode ser observada na Figura 71 e na Figura 72.



Figura 70 – Fotografia geral da sala estudada

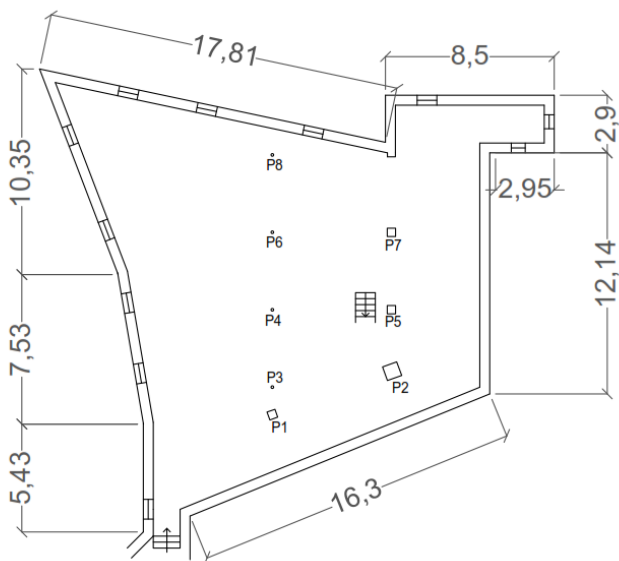


Figura 71 – Planta da sala estudada (distâncias em metros)

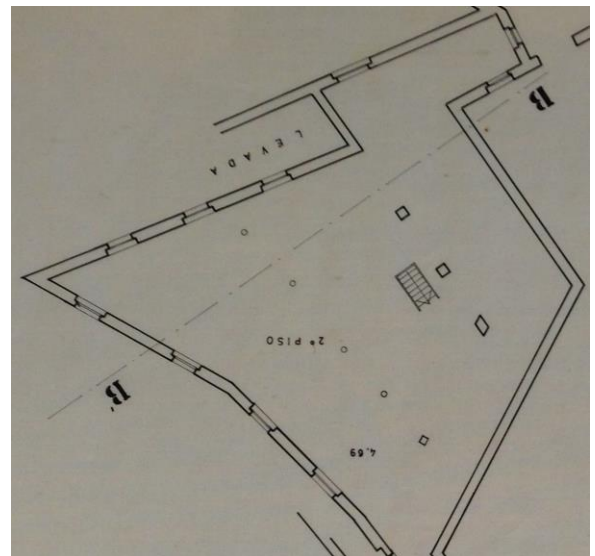


Figura 72 – Fotografia da planta da sala estudada  
(Departamento do Património – Sogrape Vinhos, SA)

O esquema estrutural da cobertura consiste numa cobertura de duas águas, constituída por 13 asnas de madeira, do tipo simples e palladio, Figura 13, que têm como apoio as paredes

exteriores da sala e os pilares intermédios da mesma. Relativamente ao esquema estrutural do pavimento, Figura 73, consiste em vigas de dimensões variáveis, com a largura a variar entre 0,17m e 0,25m e a sua altura a variar entre 0,14m e 0,20m. Importa referir que o espaçamento entre as vigas do pavimento é extremamente irregular, variando entre 0,22m e 0,64m.



Figura 73 – Vista inferior do pavimento

No interior da sala existem 8 pilares de suporte à estrutura da cobertura, sendo quatro deles metálicos com secção circular e diâmetro de 0,14m e os restantes quatro em betão, com secção variável entre  $0,42 \times 0,42\text{m}^2$  e  $0,76 \times 0,73\text{m}^2$ , estando distribuídos conforme se pode verificar na Figura 74.

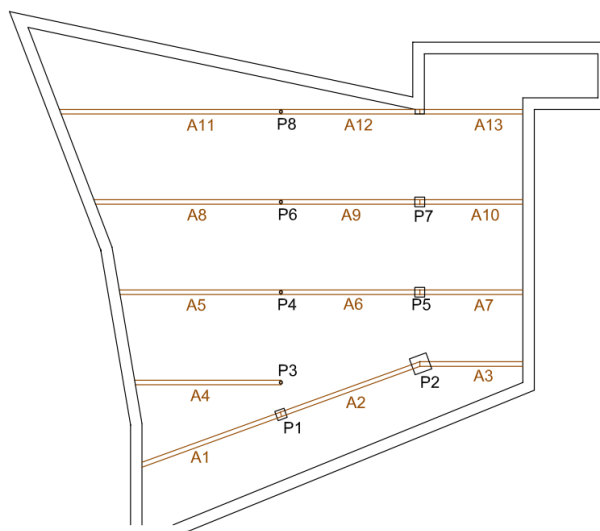


Figura 74 – Planta da sala estudada. Localização das Asnas e dos Pilares

### 5.3 Inspeção Visual

A primeira etapa deste caso de estudo consistiu numa inspeção visual da sala e dos vários elementos que a compõem. Para tal foram realizadas várias visitas à Tanoaria Ferreira de modo a obter informações sobre os vários danos/patologias existentes, assim como o seu registo fotográfico.

Logo numa análise inicial foi possível detetar problemas a nível da cobertura e do pavimento, existindo roturas em zonas de ambos os elementos, verificando-se com maior incidência no pavimento. Estes danos fizeram logo pressupor a existência de outros problemas associados, como a presença de humidade e vegetação, situação que se veio a confirmar.

Na cobertura detetou-se, para além das duas zonas onde existiu rotura do telhado, a presença de humidade e consequente podridão dos elementos de algumas asnas, por exemplo a asna 4 e a asna 5, sendo visível também a presença de vegetação nas zonas de rutura referenciadas. No entanto, devido ao elevado pé direito da sala e ao desconhecimento da segurança do

pavimento, não foi possível a utilização de meios para observar com maior detalhe os elementos da cobertura.

Relativamente ao pavimento e aos seus elementos, detetaram-se 5 zonas de rotura do pavimento, sendo a localização da zona mais gravosa no alinhamento de uma abertura na cobertura, situada junto ao pilar P8. Os poucos elementos restantes nesta zona, vigas e fragmentos do pavimento, encontravam-se bastantes degradados, sendo possível detetar um elevado grau de podridão dos mesmos. Foi possível também detetar fendas ao longo da secção das vigas do pavimento, fator este que se pode dever à exposição alternada à água da chuva e radiação solar, existindo uma absorção da água e posterior secagem por parte da radiação ultravioleta.

O facto de os elementos de madeira estarem expostos à água da chuva provoca o aumento do seu teor em água, situação ideal para a ocorrência de ataque por agentes bióticos. Este aspeto verificou-se como sendo um dos mais abrangentes a nível do pavimento, existindo vestígios de ataque por parte de insetos xilófagos, nomeadamente caruncho, numa elevada extensão do pavimento, sendo este ataque fácil de identificar devido aos orifícios nas tábuas de soalho e ao serrim existente, aspeto característico do ataque por parte destes insetos.

No Anexo II.1, apresentam-se os mapas de danos elaborados onde se descreve os diversos danos/patologias observados e dados relevantes como a localização em planta dos danos, a descrição do mesmo, possíveis causas e registos fotográficos.

#### **5.4 Análise Mecânica**

Neste subcapítulo será efetuada uma análise mecânica às amostras recolhidas, com o objetivo de recolher informações sobre a degradação existente no pavimento alvo do caso de estudo.

Estas serão alvo de uma gama de ensaios que abrange desde a simples análise do teor em água até à resistência à flexão que cada uma apresenta, dados obtidos após levar as amostras à rotura.

Na sala em estudo foram recolhidos 6 amostras (Figura 75), sendo as suas faces numeradas de P01 a P12. Esta reduzida gama de amostras deve-se às restrições relativas à sua obtenção, não sendo possível o estudo pormenorizado de todo o pavimento e tendo a única possibilidade sido a extração de tábuas de soalho que apresentavam já alguma degradação e se encontravam soltas da estrutura do pavimento. No entanto, para a realização dos ensaios experimentais foi eliminada uma das amostras, P09/P10, devido a apresentar dimensões bastantes reduzidas e que impossibilitava o seu estudo.

Os dados iniciais tais como, dimensões, peso e densidade, encontram-se no Quadro 13, apresentando-se na Figura 76 e na Figura 77 os locais de onde foram extraídas as amostras a analisar. Importa referir que as densidades referidas no quadro seguinte são meramente indicativas, uma vez que os elementos apresentavam secções variáveis ao longo do seu desenvolvimento, tendo por isso sido calculadas as suas densidades com valores médios das dimensões.

Quadro 13 – Dados iniciais das amostras

	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Espessura (mm)	Peso (g)	Densidade aproximada (kg/m <sup>3</sup> )
<b>P01/P02</b>	300	685	26	2750	510
<b>P03/P04</b>	297	730	27	3220	550
<b>P05/P06</b>	185	910	35	2123	360
<b>P07/P08</b>	180	918	33	2610	480
<b>P11/P12</b>	175	1210	32	3165	470

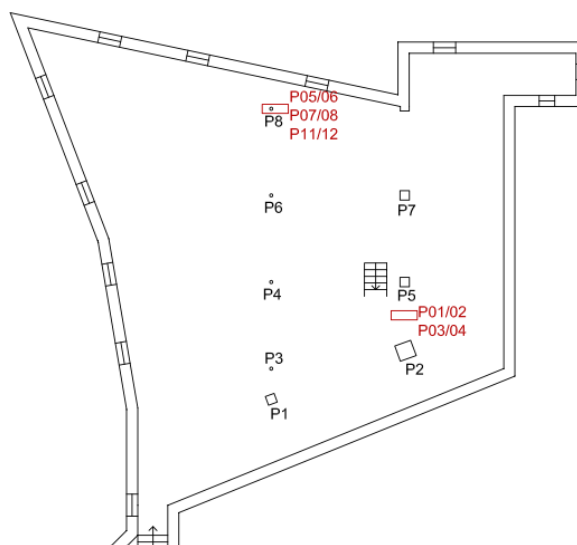


Figura 75 – Localização em planta das amostras extraídas para estudo



Figura 76 – Localização das amostras P01 a P04



Figura 77 – Localização das amostras P05 a P12

#### 5.4.1 *Higrómetro*

Uma das primeiras variáveis a ser analisadas relativamente aos provetes em madeira foi o teor em água que apresentavam. Para determinação desses valores foi utilizado o sistema de medição de humidade *Protimeter Plus* (Figura 78):



Figura 78 – Medição de humidade das amostras através do uso do *Protimeter Plus*



Figura 79 – Zonas de aplicação do Protimeter para avaliar teor em água

Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 14:

Quadro 14 – Resultado das medições de humidade

	Medições (%)			Valor Médio (%)
	E	C	D	
<b>P01</b>	12.00	11.60	11.40	11.67
<b>P02</b>	11.30	12.10	11.20	11.53
<b>P03</b>	12.70	11.80	11.90	12.13
<b>P04</b>	11.60	11.40	11.10	11.37
<b>P05</b>	12.40	13.40	14.00	13.27
<b>P06</b>	12.40	12.60	12.40	12.47
<b>P07</b>	11.40	10.30	18.40	13.37
<b>P08</b>	10.70	11.40	16.30	12.80
<b>P11</b>	15.50	16.00	14.20	15.23
<b>P12</b>	11.70	10.70	11.50	11.30



Após análise dos dados obtidos, verifica-se que o teor em água médio é de 12,51%, podendo-se constatar no entanto que existem valores elevados, estando próximos do valor de teor em água a partir do qual o risco de existir ataque por parte de fungos acresce (teor em água > 20%), nomeadamente na extremidade direita da face P07 e em todo o desenvolvimento da face P11.

#### 5.4.2 *Pilodyn*

Para a realização dos ensaios com o *Pilodyn*, recorreu-se ao equipamento *Pilodyn 6J*, cujas especificações técnicas foram referidas anteriormente no subcapítulo 4.1.8, e cujo objetivo da experiência consistiu na determinação das densidades das amostras através dos valores das profundidades de penetração registadas pelo *Pilodyn*. Uma inspeção visual inicial permitiu classificar a espécie de madeira como sendo Pinho, aspeto que será abordado com mais profundidade no subcapítulo 5.4.6, possibilitando assim o recurso a estudos existentes (Lopes *et al.*; 2010), de modo a correlacionar os valores obtidos de penetração com propriedades da madeira como a massa volúmica ( $\rho$ ).



Figura 80 – Imagem ilustrativa das zonas de aplicação do *Pilodyn*

Com base na correlação presente na bibliografia indicada, a densidade em função da profundidade de penetração pode ser calculada pela seguinte expressão:

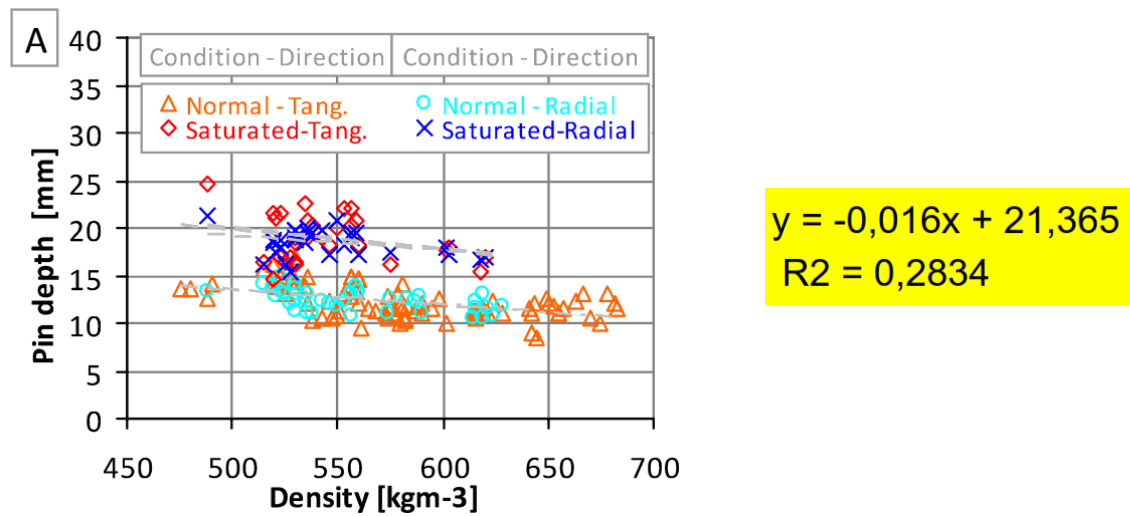


Figura 81 – Relação entre a profundidade de penetração do *Pilodyn 6J* e a densidade da madeira, para a espécie *Pinus Pinaster* (Lopes *et al.*; 2010)

$$\rho = \frac{(\text{profundidade} - 21,365)}{-0,016} \quad (21)$$

Quadro 15 – Valores médios obtidos com o Pilodyn e respetiva densidade

	Medições Médias (mm)		Densidade ( $kg/m^3$ )	
	Esquerda	Direita		
P01	15.67	13.33	356.15	501.98
P02	13.00	14.00	522.81	460.31
P03	12.67	13.67	543.65	481.15
P04	13.00	12.67	522.81	543.65
P05	20.00	18.33	85.31	189.48
P06	18.33	19.00	189.48	147.81
P07	12.00	15.00	585.31	397.81
P08	11.00	13.33	647.81	501.98
P11	17.00	15.67	272.81	356.15
P12	16.00	16.00	335.31	335.31

É importante referir que o gráfico de relação Profundidade/Densidade utilizado apresenta duas linhas de tendência, uma para provetes em condições normais, que apresentam valores de penetração entre os 10 e 13 mm, e outra para provetes saturados em água, que apresentam valores de penetração elevados, entre os 15 e 20 mm. No caso em estudo, e apesar da obtenção de valores de penetração elevados, utiliza-se a regressão linear correspondente a provetes em condições normais pois as amostras recolhidas não se encontravam saturados, e o facto de terem sido obtidas penetrações tão elevadas deve-se ao estado dos provetes, que estão visivelmente afetados por agentes bióticos. Importa referir no entanto, que esta correlação apresenta um valor de  $R^2$  muito baixo ( $R^2 = 0,2834$ ).

#### 5.4.3 *Grindosonic*

Este ensaio tem como objetivo obter as frequências naturais do modo de vibração fundamental de cada uma das amostras, seguidamente será possível obter os módulos de elasticidade dinâmica correspondentes. Para a realização deste ensaio utilizou-se um equipamento Grindosonic e 4 martelos diferentes para indução de vibração, com o intuito de averiguar a influência do tipo de martelo nos valores encontrado foi seguido o procedimento de ensaio referido anteriormente no subcapítulo 4.1.7.1.

Inicialmente determinou-se qual dos martelos apresentava um melhor desempenho, originando valores mais constantes. Para tal efetuaram-se varias medições com cada um dos martelos, segundo os mesmos critérios, com o detetor piezométrico situado sobre um apoio (M2) e a indução por parte do martelo a ser realizada na zona central do provete (P2) (Figura 82).

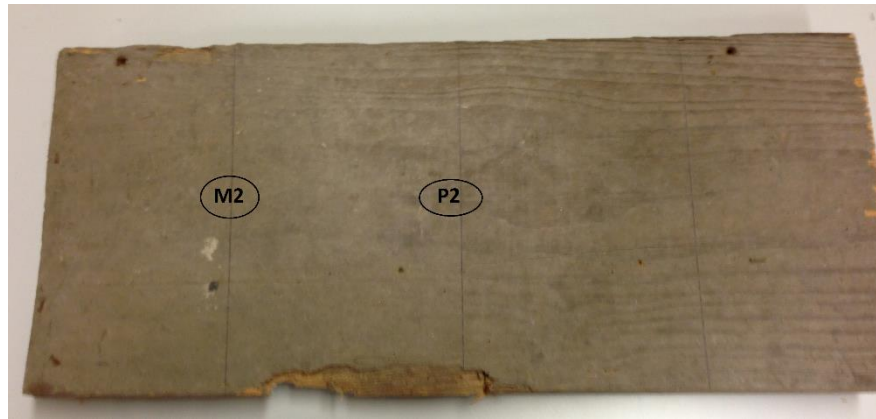


Figura 82 – Esquema ilustrativo das zonas de utilizadas no ensaio para determinação do martelo a utilizar

Os martelos utilizados foram:



Figura 83 – Martelo H1      Figura 84 – Martelo H2      Figura 85 – Martelo H3

Figura 86 – Martelo H4

Após a utilização dos diferentes martelos, obtiveram-se os seguintes resultados:

Quadro 16 – Resultados obtidos na escolha do martelo a utilizar

	Valores de frequência (Hz)				
<b>M2P2-H1</b>	562.70	553.00	1240.00	1399.00	1499.00
<b>M2P2-H2</b>	1396.00	1295.00	1420.00	1089.00	1126.00
<b>M2P2-H3</b>	1634.00	1246.00	1210.00	1210.00	1274.00
<b>M2P2-H4</b>	342.00	437.20	1471.00	914.60	325.80

Observando os resultados obtidos, verificam-se variações acentuadas entre os vários valores de cada martelo. Seguidamente, e com base nos resultados obtidos, efetuaram-se as medições nas amostras utilizando o martelo H3 (martelo com valores de frequência mais uniformes), desta vez abordando as variações provocadas pelas grandes dimensões das amostras, com o detetor piezométrico a ser situado em três zonas (M1, M2 e M3) e a indução por parte do martelo a ser realizada também em três zonas da amostra (P1, P2 e P3) (Figura 87).

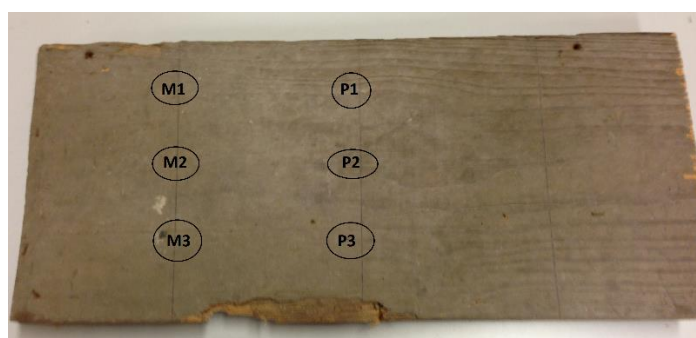


Figura 87 – Zonas de colocação do detetor piezométrico e zonas de indução da vibração

Quadro 17 – Resultados obtidos na análise da amostra P02

		Valores de frequência (Hz) – P02				
Martelo 3	M1P1	762.00	714.00	876.00	885.00	774.00
	M1P2	961.00	958.00	950.00	960.00	958.00
	M1P3	1411.00	1773.00	2000.00	1375.00	814.50
	M2P1	1294.00	1081.00	952.70	1081.00	1134.00
	M2P2	1049.00	1166.00	1298.00	1129.00	1355.00
	M2P3	1043.00	829.40	1406.00	1008.00	1426.00
	M3P1	1294.00	881.20	976.20	881.50	806.80
	M3P2	875.00	1053.00	1075.00	912.00	1137.00
	M3P3	1111.00	1115.00	851.00	1108.00	1105.00

Após a análise dos resultados obtidos, pode-se verificar que a realização dos ensaios com o Grindosonic em amostras de elevadas dimensões, nomeadamente a largura dos mesmos, origina valores de frequência bastantes dispersos. Estes resultados devem-se ao facto de as

amostras, devido às suas dimensões consideráveis, apresentarem um comportamento à vibração semelhante ao verificado em lajes (Figura 88).

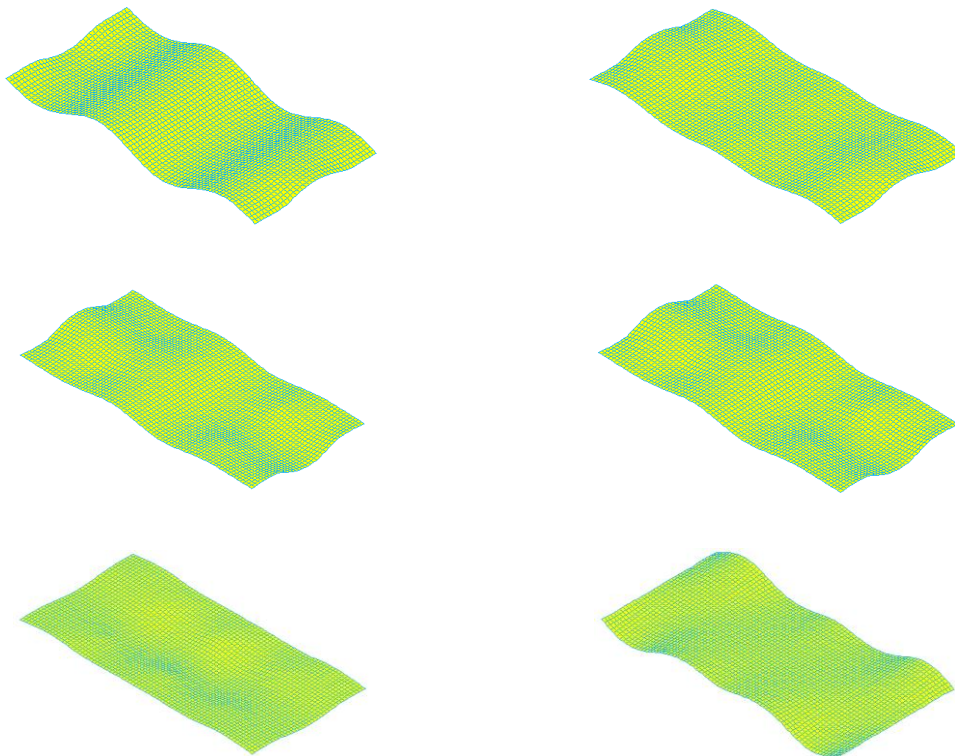


Figura 88 – Exemplo das variações verificadas nos primeiros 6 modos de vibração de uma laje (Moutinho *et al.*; 2010)

Em face dos resultados obtidos optou-se por não estender a realização deste ensaio às restantes amostras em estudo. Em alternativa decidiu-se extrair 2 provetes com dimensões mais reduzidas de cada amostra e realizar o ensaio com o Grindosonic a estes provetes.

Devido a duas das amostras analisadas terem comprimentos relativamente inferiores às restantes, elaboraram-se dois tipos de provetes, quatro com secção de 15x15mm e

comprimento de 300mm e seis provetes de secção 25x25mm e comprimento de 400mm (Quadro 18).

Quadro 18 – Dados iniciais dos provetes isentos de defeitos

	Comprimento ( <i>mm</i> )	Secção da base ( <i>mm</i> )	Peso ( <i>g</i> )	Densidade ( <i>kg/m<sup>3</sup></i> )
<b>P02 - 1</b>	300	(15x15)	30	440
<b>P02 - 2</b>	300	(15x15)	30	440
<b>P03 - 1</b>	300	(15x15)	30	440
<b>P03 - 2</b>	300	(15x15)	30	440
<b>P05 - 1</b>	400	(25x25)	110	440
<b>P05 - 2</b>	400	(25x25)	110	440
<b>P08 - 1</b>	400	(25x25)	125	500
<b>P08 - 2</b>	400	(25x25)	105	420
<b>P12 - 1</b>	400	(25x25)	115	460
<b>P12 - 2</b>	400	(25x25)	120	480

De seguida realizou-se o mesmo protocolo experimental descrito no Capítulo 5.4.4, de acordo com a norma ASTM E 187601 *GRINDOSONIC*.



Figura 89 – Provette pequeno com a localização dos nós (a  $0,224 \times l$  das faces)



Figura 90 – Zona de colocação do detetor piezométrico e zona de indução da vibração

Após este procedimento, os resultados obtidos para a frequência (Hz) do primeiro modo de vibração foram os seguintes:

Quadro 19 – Valores médios de frequência (medições M2-P2)

	Valores médios de frequência (Hz)
P02 - 1	513.48
P02 - 2	686.13
P03 - 1	607.05
P03 - 2	561.38
P05 - 1	588.10
P05 - 2	519.95
P08 - 1	593.13
P08 - 2	576.60
P12 - 1	665.70
P12 - 2	424.30

A relativa discrepância entre os valores obtidos para provetes da mesma tábua de soalho deve-se à degradação causada por agentes bióticos que, como é normal, não apresenta uniformidade em toda a peça, havendo assim zonas mais afetadas que outras. Outro aspeto determinante da discrepância de resultados obtidos foi a existência de nós nos provetes P05-2 e no provete P12-2, como se poderá verificar nas figuras presentes no Anexo II.2.

Com os resultados obtidos, utilizou-se uma folha de cálculo Excel, que se apresenta no Anexo II.3, para determinar o valor do módulo de elasticidade dinâmico (Quadro 20).

Quadro 20 – Valores médios do Módulo de Elasticidade ( $E_{dyn}$ ) obtidos

$E_{dyn}$ (Gpa)			
P02 - 1	4.06	P08 - 1	6.98
P02 - 2	7.26	P08 - 2	5.55
P03 - 1	5.68	P12 - 1	8.11
P03 - 2	4.86	P12 - 2	3.43
P05 - 1	6.04		
P05 - 2	4.73		



#### 5.4.4 Ensaio à flexão

Este ensaio foi realizado segundo a norma (NP310; 2000), tendo sido utilizado para tal, equipamento existente no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia do Porto. Para a sua realização, foi utilizado um *setup* constituído por dois apoios fixos para o provete, afastados de um comprimento  $l_1$  (Figura 91), e o sistema hidráulico de carga (Figura 92).

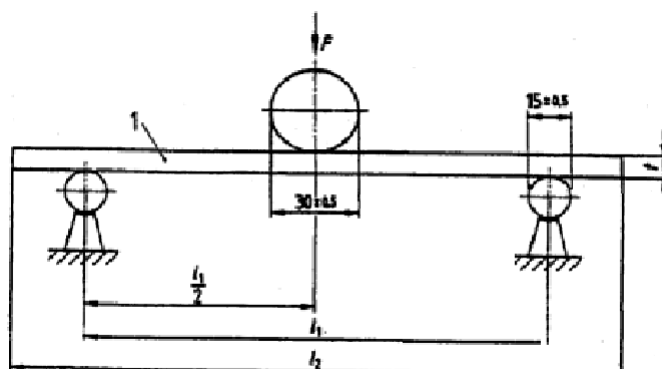


Figura 91 – Esquema de ensaio à flexão (NP310; 2000)

$l$  = *proвете*;

$l_1 = 20 \times t$

$F$  = *carga*

$l_2 = l_1 + 50$

$t$  = *espessura do provete*



Figura 92 – Ensaio à flexão

Das 5 amostras, não foi possível obter resultados relativos à última amostra ensaiada devido a problemas com o software do sistema hidráulico.

Com os resultados obtidos, foi possível calcular o módulo de elasticidade em flexão,  $E_m$ , através da seguintes expressão:

$$E_m = \frac{l^3 \times (F_2 - F_1)}{4 \times b \times t^3 \times (a_2 - a_1)} \quad (N/mm^2) \quad (22)$$

em que:

$l$  – Distancia entre os centros dos apoios, em milímetros;

$b$  – Largura do provete, em milímetros;

$t$  – Espessura do provete, em milímetros;

$F_2 - F_1$  – É o incremento de força, em Newton, na secção reta da curva força-deformação (Figura 93).  $F_1$  deve ser aproximadamente 10% e  $F_2$  aproximadamente 40% da carga de rotura;

$a_2 - a_1$  – É o incremento da flecha a meio-comprimento do provete (correspondente a  $F_2 - F_1$ ).

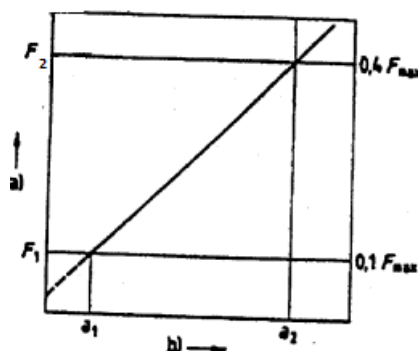


Figura 93 – Curva força-deformação, na zona da deformação elástica

A resistência à flexão,  $f_m$ , pode ser calculada através a expressão:

$$f_m = \frac{3 \times F_{max} \times l1}{2 \times b \times t^2} \quad (23)$$

em que:

$F_{max}$  – É a carga de rotura, em Newton;

$l1$ ,  $b$ ,  $t$ , estão em milímetros.

Com base nos procedimentos e expressões descritos na norma, obtiveram-se os seguintes valores:

Quadro 21 – Dados iniciais para realização do ensaio à flexão

	$t$ (mm)	$l1$ (mm)	$l2$ (mm)	$b$
<b>P02</b>	26	520	570	300
<b>P03</b>	27	540	590	297
<b>P05</b>	35	700	750	185
<b>P08</b>	33	660	710	180
<b>P12</b>	32	640	690	175

Quadro 22 – Resultados obtidos no ensaio à flexão

	$F_{max}$ (kN)	$F1$	$F2$	$a1$	$a2$
<b>P02</b>	5.283	0.5283	2.1132	0.833438	3.46499
<b>P03</b>	6.711	0.6711	2.6844	1.239703	4.851309
<b>P05</b>	3.918	0.3918	1.5672	3.797017	7.376266
<b>P08</b>	3.819	0.3819	1.5276	1.179575	4.416447
<b>P12</b>					

Quadro 23 – Resultados finais do módulo de elasticidade e da resistência à flexão

	$E_m$ (GPa)	$f_{m,k}$ (Mpa)
P02	4.015	20.319
P03	3.754	25.107
P05	3.550	18.153
P08	3.933	19.288
P12		

- Amostra P02



Figura 94 – Amostra P02

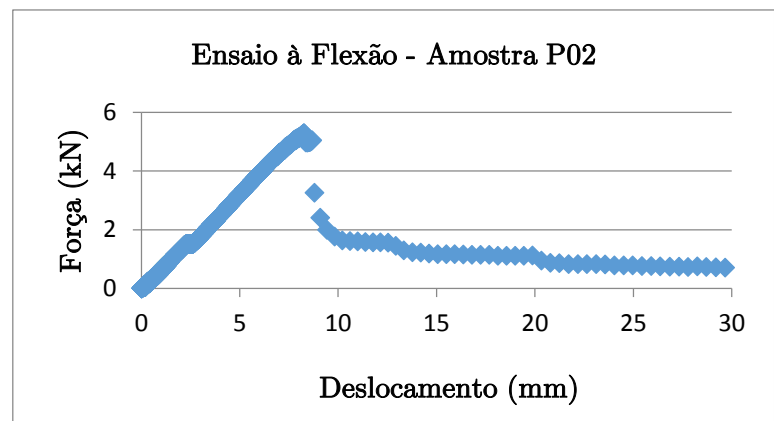


Figura 95 – Gráfico Força/Deslocamento da Amostra P02

- Amostra P03

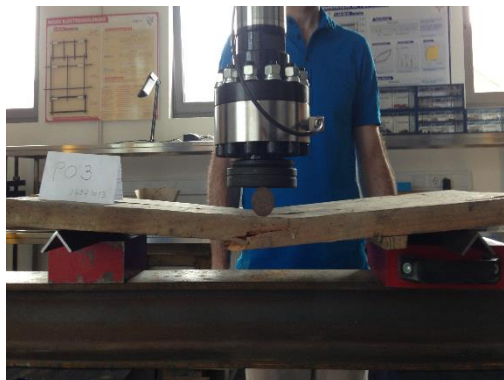


Figura 96 – Amostra P03

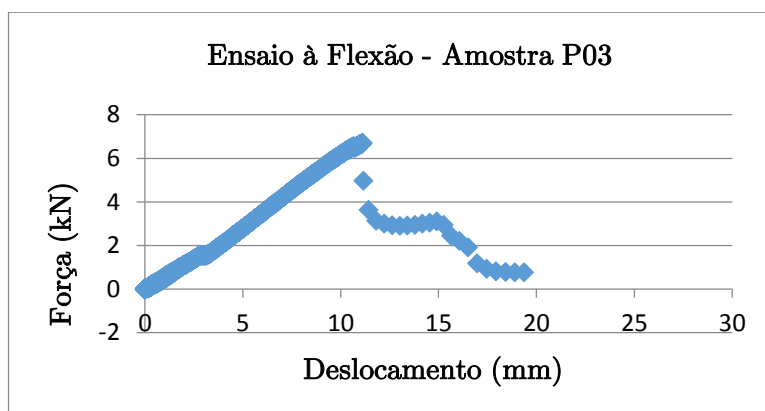


Figura 97 – Gráfico Força/Deslocamento da Amostra P03

- Amostra P05



Figura 98 – Amostra P05

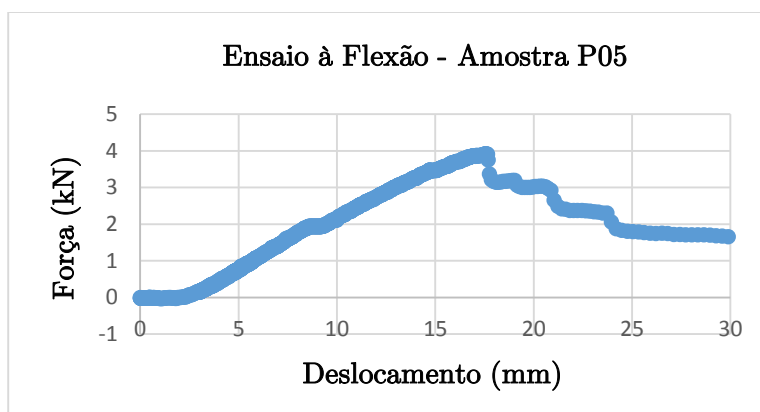


Figura 99 – Gráfico Força/Deslocamento do Amostra P05

- **Amostra P08**



Figura 100 – Amostra P08

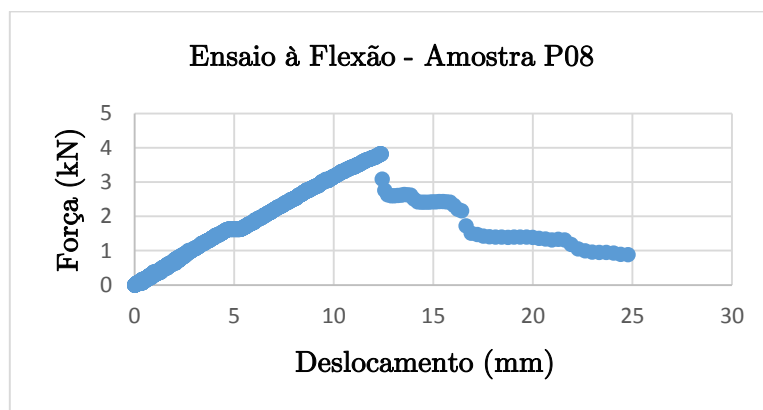


Figura 101 – Gráfico Força/Deslocamento da Amostra P08

Através da observação dos gráficos Força/Deslocamento obtidos é possível verificar que as amostras apresentam um comportamento frágil, situação indesejável pois na construção não se deve utilizar materiais com comportamentos frágeis.

#### 5.4.5 *Identificação da espécie de madeira*

Os provetes removidos permitiram identificar a espécie de madeira em estudo, tendo esta identificação sido efetuada no Laboratório de Física das Construções-Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia do Porto. Numa primeira fase, foi efetuada uma análise visual com recurso à lupa da secção longitudinal e da secção transversal das peças, tendo-se posteriormente, recorrido ao software *macroHOLZdata*. Esta análise, juntamente com os dados obtidos experimentalmente, nomeadamente a densidade dos provetes (Quadro 18), e considerando as gamas de valores referenciadas em bibliografias como a especificação M2 do LNEC e a EN NP4305, permitiu caracterizar a madeira em estudo como sendo da espécie Pinho.

### 5.4.6 Conclusões

A realização desta gama de ensaios experimentais permitiu obter valiosas informações relativas ao estado de degradação das amostras, tendo as metodologias como Inspeção Visual, Higrómetro e *Pilodyn* fornecido dados relativos à degradação existente devido à ação de agentes bióticos e exposição aos agentes atmosféricos, sendo de destacar as condições dos provetes P05 e P11 que apresentam valores de teor em água e de profundidade de penetração elevados.

Relativamente aos módulos de elasticidade obtidos, apresentam valores significativamente mais baixos em relação a resultados obtidos em outros estudos com madeira natural ( $E_{mean,0} = 9 \text{ a } 14 \text{ GPa}$ ). Este facto deve-se à idade apresentada pelos provetes estudados e, uma vez mais, à degradação existente nos provetes, fator de elevada influência na capacidade resistente da madeira.

De seguida, apresenta-se o quadro resumo (Quadro 24), onde são comparados os valores de módulo de elasticidade obtidos através do Grindosonic ( $E_{dyn}$ ) e através do Ensaio à flexão ( $E_{static}$ ), onde se pode verificar que os valores obtidos do módulo de elasticidade dinâmico foram sempre superiores aos módulos de elasticidades obtidos no ensaio à flexão.

Quadro 24 – Quadro resumo dos módulos de elasticidade obtidos experimentalmente

	$E_{dyn} \text{ (Gpa)}$	$E_{static} \text{ (Gpa)}$
<b>P02</b>	5.66	4.02
<b>P03</b>	5.27	3.75
<b>P05</b>	5.39	3.55
<b>P08</b>	6.27	3.93
<b>P12</b>	5.77	

Com bases nos resultados obtidos ao longo deste Capítulo 5, e de acordo com a classificação apresentada na norma EN 338, é possível atribuir a classe de resistência à madeira segundo os vários parâmetros estudados, sendo eles:

- Propriedades de resistência

$$f_{m,k} = 20,72 \text{ MPa} \quad \rightarrow \quad C18$$

- Propriedades de rigidez

$$E_m = 3,813 \text{ GPa} \quad \rightarrow \quad C14$$

$$G = 0,24 \text{ MPa} \quad \rightarrow \quad C14$$

$$\rho_{mean} = 451,8 \text{ kg/m}^3 \quad \rightarrow \quad C27$$

## 5.5 Análise Estrutural

Este subcapítulo refere-se à avaliação da segurança de um pavimento, soalho e vigas, que será efetuado obedecendo aos critérios de verificação dos estados limite, de modo a serem verificadas todas as condições de segurança. Para tal, deverão ser tidos em conta os estados limite últimos, nomeadamente verificação à flexão simples das tábuas de soalho e das vigas, verificação ao corte do soalho e das vigas e verificação da instabilidade lateral-torsional das vigas.

Relativamente aos estados limite de utilização, deverá ser verificada a deformação do soalho e das vigas assim como, a vibração e satisfação das condições de conforto.

Para tal considerou-se uma secção do pavimento, Figura 102 e Figura 103, com 6x3,41 metros, sendo os 6 metros correspondentes ao vão das vigas e o 3,41 metros à largura da secção do soalho estudado.



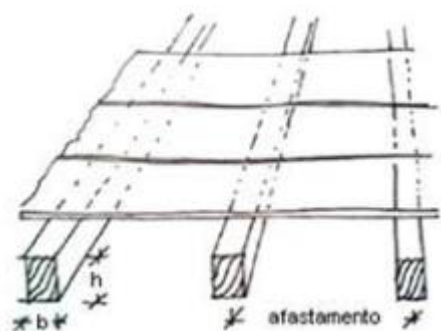


Figura 102 – Secções transversais e afastamentos das vigas (Martins; 2010)

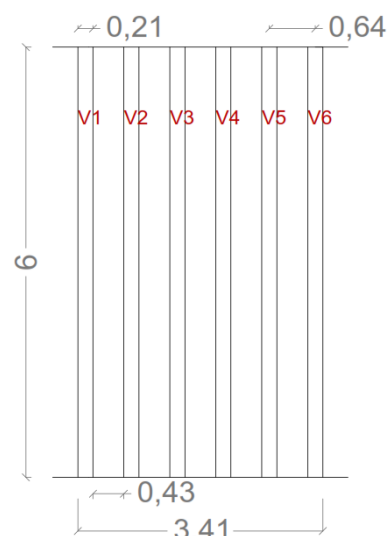


Figura 103 – Esquema da secção de pavimento estudada

Tábua padrão (valores utilizados):

- Largura = 0,30 metros
- Comprimento = 0,70 metros
- Espessura = 0,026 metros

Dados sobre as vigas:

Quadro 25 – Dimensões das vigas

	Altura (cm)	Largura (cm)	Comprimento (cm)
V1	18	20	600
V2	17	25	600
V3	18	21	600
V4	19	21	600
V5	14	17	600
V6	20	21	600

Quadro 26 – Afastamento entre Vigas

	Afastamento entre vigas (cm)
V1/V2	27
V2/V3	64
V3/V4	22
V4/V5	41
V5/V6	31

Viga padrão (valores médios):

- Largura = 0,21 metros
- Comprimento = 6 metros
- Altura = 0,18 metros
- Afastamento entre vigas máximo = 0,64 metros

Os estudos foram desenvolvidos com o objetivo de obter as cargas máximas de utilização compatíveis com as verificações de segurança.

#### 5.5.1 *Soalho*

Com base no tipo de carregamento existente (Figura 104), carga uniformemente distribuída, e recorrendo à ferramenta Ftool, foi possível elaborar os diagramas de esforços atuantes, que se apresentam na Figura 105 e na Figura 106.

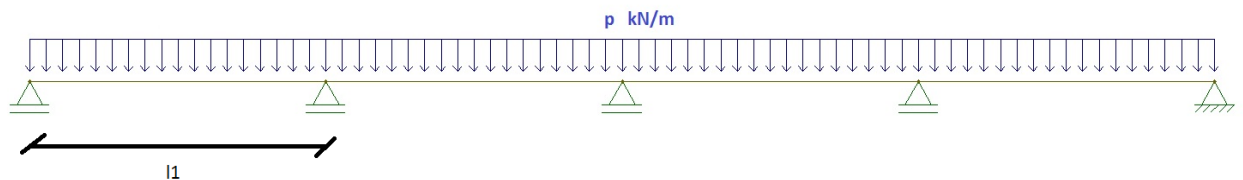


Figura 104 – Esquema estrutural do Soalho

$$l_1 = 0,64 \text{ metros}$$

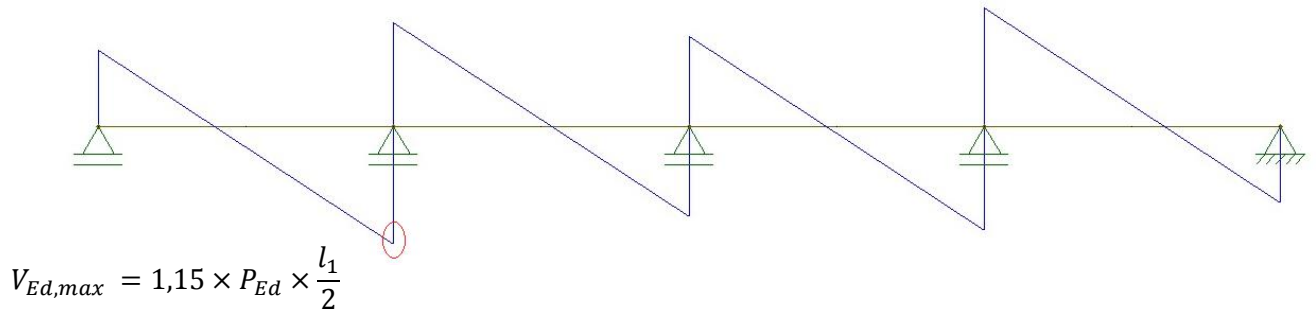


Figura 105 – Diagrama de Esforços Transversos do Soalho

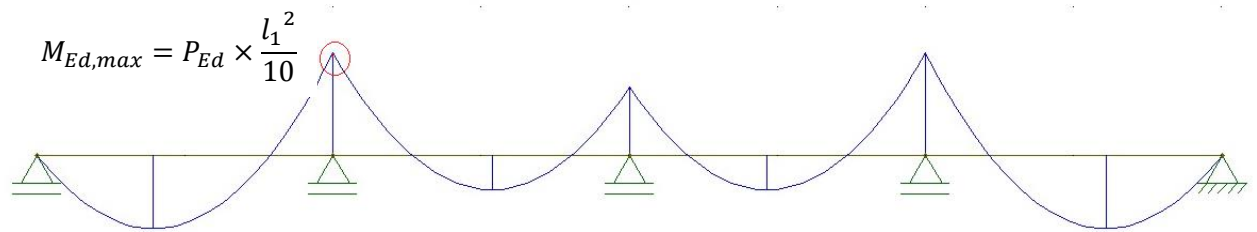


Figura 106 – Diagrama dos Momentos Fletores do Soalho

#### 5.5.1.1 Flexão Simples

Na verificação da flexão simples, deve ser satisfeita a seguinte condição:

$$\sigma_{Ed} \leq \sigma_{Rd} \quad (24)$$

Em que, a tensão atuante pode ser calculada através de:

$$\sigma_{ed} = \frac{M_{Ed}}{\omega} \quad (25)$$

As componentes necessárias para determinação da tensão atuantes, são obtidas através das seguintes expressões:

$$\omega = \frac{I}{\left(\frac{h}{2}\right)} \quad (26)$$

$$I = \frac{b \times h^3}{12} \quad (27)$$

$$\omega = \frac{b \times h^2}{6} \quad (28)$$

$$\omega_{tábua} = \frac{0,3 \times 0,026^2}{6} = 3,38 \times 10^{-5} m^3$$

Após a obtenção do valor de  $\omega_{tábua}$ , resta obter o valor da tensão resistente,  $\sigma_{Rd}$ , dado calculado com bases nos resultados experimentais.

$$\sigma_{Rd} = k_{mod} \times \frac{\sigma_{k,0.05}}{\gamma_M} \quad (29)$$

Para a obtenção do valor de  $\sigma_{k,0.05}$ , é necessário recorrer a uma distribuição estatística (Figura 107), tendo em conta o valor médio da tensão e componentes estatísticas (Quadro 27).

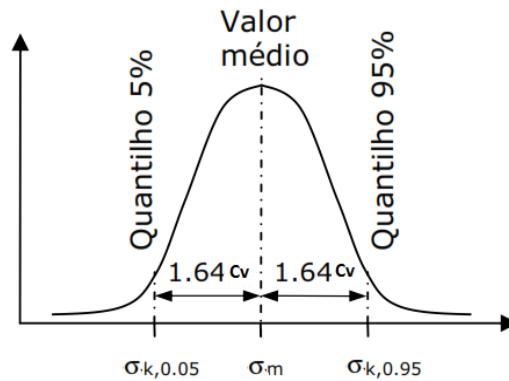


Figura 107 – Distribuição estatística dos valores de tensões

em que,

$$\sigma_{k,0.05} = \sigma_m \times (1 - 1,64 \times C_v) \quad (30)$$

$$C_v = \frac{\text{Desvio Padrão}}{\text{Média}} \quad (31)$$

Quadro 27 – Valores das Tensões resistentes obtidos experimentalmente

$\sigma_{\text{ensaio}}$	$\sigma_m$	<i>Desvio Padrão</i>	$C_v$
20,32	20,72	3,0595	0,1477
25,11			
18,15			
19,29			

Com base nestes valores, obtém-se:

$$\sigma_{k,0.05} = 20,72 \times (1 - 1,64 \times 0,1477)$$

$$\sigma_{k,0.05} = 15,70 \text{ MPa}$$

A partir do valor característico, é possível obter o valor resistente, através da divisão do valor característico pelo coeficiente parcial de segurança, estando considerado no EC5 que para o caso de madeira maciça, esse coeficiente deverá ser igual a 1,3. Deve também ser tido em consideração o parâmetro  $k_{mod}$ , fator de modificação da resistência que traduz o efeito da duração da carga nas propriedades mecânicas.

Para o pavimento em estudo, e tendo em conta as classes de serviço definidas no Capítulo 2, considerou-se a estrutura como sendo Classe de serviço 2.

$$\text{Classe de serviço 2 (Ações Permanentes)} \rightarrow k_{mod} = 0,6$$

$$\sigma_{Rd} = k_{mod} \times \frac{\sigma_{k,0.05}}{\gamma_M}$$

$$\gamma_M (\text{Madeira Maciça}) = 1,3$$

Logo,

$$\sigma_{Rd} = 0,6 \times \frac{15,70}{1,3}$$

$$\sigma_{Rd} = 7,25 \text{ MPa}$$

Igualando a tensão atuante à tensão resistente, e substituindo o valor do momento pela expressão do valor máximo de momento atuante, obtém-se o seguinte valor para a carga:

$$\sigma_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{\omega}$$

$$\sigma_{Ed} = \frac{P_{Ed} \times \frac{0,64^2}{10}}{3,38 \times 10^{-5}} \leq 7,25 \times 10^3$$

$$P_{Ed} \leq 5,98 \text{ kN/m}$$

Como a largura da tábua é de 0,30 metros, a carga atuante por  $m^2$  é:

$$P_{Ed} \leq \frac{5,98}{0,3} \leq 19,93 \text{ kN/m}^2$$

### 5.5.1.2 Corte

Relativamente à verificação de segurança ao corte, deve ser satisfeita a seguinte condição:

$$\tau_{Ed} \leq \tau_{Rd} \tag{32}$$

Como não foi possível obter o valor de  $\tau_{Rd}$  experimentalmente, recorreu-se aos valores tabelados na norma EN 338. Verificou-se anteriormente que os provetes apresentam uma resistência à flexão de aproximadamente 20 MPa, o que colocaria a madeira como tendo

uma classe de resistência C18 e consequentemente uma tensão resistente ao corte de 2,0 MPa. No entanto, de modo a realizar os cálculos numa vertente pelo lado da segurança, optou-se por utilizar os valores relativos à classe C14.

Logo,

$$\tau_{Rd} = 1,7 \text{ MPa}$$

Como estamos perante um elemento com secção retangular ( $A = b \times h$ ), o EC5 define o valor máximo de corte desenvolvido na secção como sendo dado pela tensão tangencial instalada a meia altura da secção, sendo calculado esse valor pela seguinte expressão:

$$\tau_{Ed} = \frac{3}{2} \times \frac{V_{Ed}}{A} \quad (33)$$

Igualando as expressões da condição de segurança, e substituindo o valor do esforço transversal pela expressão do valor máximo de esforço transversal atuante, obtém-se o seguinte valor para a carga:

$$\tau_{Ed} = \frac{3}{2} \times \frac{1,15 \times P_{Ed} \times \frac{0,64}{2}}{(0,3 \times 0,026)} \leq 1,7 \times 10^3$$

$$P_{Ed} \leq 24,02 \text{ kN/m}$$

Como a largura da tábuia é de 0,30 metros, a carga atuante por  $m^2$  é:

$$P_{Ed} \leq \frac{24,02}{0,3} \leq 80,07 \text{ kN/m}^2$$

### 5.5.2 Vigas

Tal como no caso do soalho, com base no tipo de carregamento existente (Figura 108), carga uniformemente distribuída, e recorrendo à ferramenta Ftool, foi possível elaborar os diagramas de esforços atuantes, que se encontram na Figura 109 e na Figura 110.

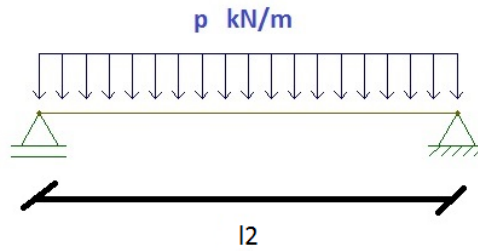


Figura 108 – Esquema estrutural das Vigas

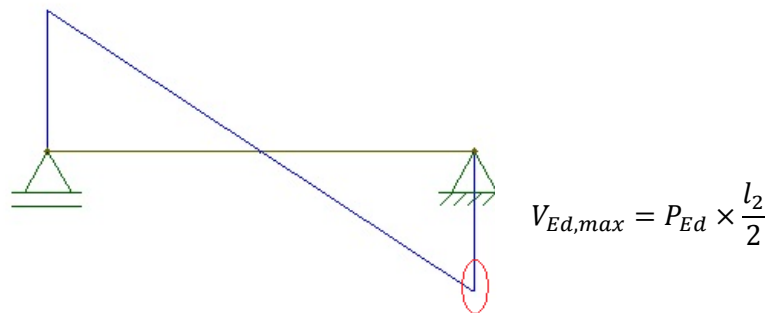


Figura 109 – Diagrama dos Esforços Transversos da Viga

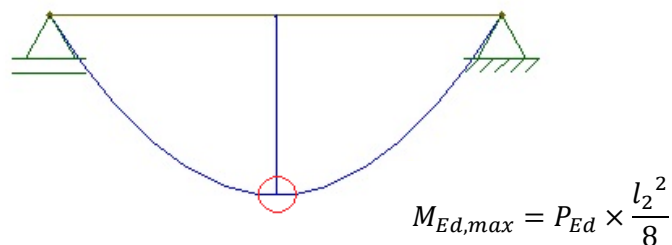


Figura 110 – Diagrama dos Momentos Fletores da Viga



### 5.5.2.1 Flexão Simples

Na verificação da flexão simples, deve ser satisfeita a seguinte expressão:

$$\sigma_{Ed} = \sigma_{Rd}$$

Em que, a tensão atuante pode ser calculada através de:

$$\sigma_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{\omega}$$

As componentes necessárias para determinação da tensão atuantes, são obtidas através das seguintes expressões:

$$\omega = \frac{I}{\left(\frac{h}{2}\right)}$$

$$I = \frac{b \times h^3}{12}$$

$$\omega = \frac{b \times h^2}{6}$$

$$\omega_{viga} = \frac{0,21 \times 0,18^2}{6} = 1,134 \times 10^{-3} m^3$$

Considerando o valor de tensão resistente obtido anteriormente, igualando a tensão atuante à tensão resistente e substituindo o valor do momento pela expressão do valor máximo de momento atuante, obtém-se o seguinte valor para a carga:

$$\sigma_{Rd} = 7,25 MPa$$

$$\sigma_{Ed} = \frac{P_{Ed} \times \frac{6^2}{8}}{1,134 \times 10^{-3}} \leq 7,25 \times 10^3$$

$$P_{Ed} \leq 1,83 \text{ kN/m}$$

Como o afastamento entre apoios é de 0,64 metros, a carga atuante por  $m^2$  é:

$$P_{Ed} \leq \frac{1,83}{0,64} \leq 2,86 \text{ kN/m}^2$$

### 5.5.2.2 Corte

Tendo em vista a verificação de segurança ao corte, deve ser satisfeita a seguinte expressão:

$$\tau_{Ed} \leq \tau_{Rd}$$

Considerando as mesmas condições vistas no subcapítulo 5.5.1.2, igualando a expressão da condição de segurança, e substituindo o valor do esforço transversal pela expressão do valor máximo de esforço transversal atuante, obtém-se o seguinte valor para a carga:

$$\tau_{Rd} = 1,7 \text{ MPa}$$

$$\tau_{Ed} = \frac{3}{2} \times \frac{V_{Ed}}{A}$$

$$\tau_{Ed} = \frac{3}{2} \times \frac{P_{Ed} \times \frac{6}{2}}{(0,21 \times 0,18)} \leq 1,7 \times 10^3$$

$$P_{Ed} \leq 14,28 \text{ kN/m}$$

Como o afastamento entre apoios é de 0,64 metros, a carga atuante por  $m^2$  é:

$$P_{Ed} \leq \frac{14,28}{0,64} \leq 22,31 \text{ kN/m}^2$$

### 5.5.2.3 Instabilidade Lateral-torsional

Para a verificação da resistência ao bambeamento, é necessário calcular o valor do momento fletor máximo para o qual a viga entra em bambeamento denominado como momento crítico,  $M_{crit}$ .

Este momento crítico, tendo como referência uma viga simplesmente apoiada, pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$M_{crit} = \frac{\pi}{l_{ef}} \times \sqrt{E_{0.05} \times I \times I_{tor} \times G} \quad (34)$$

em que:

$E_{0.05}$  – Valor característico do módulo de elasticidade;

$I$  – Momento de inércia;

$G$  – Módulo de distorção;

$I_{tor}$  – Momento de inercia torsional;

$l_{ef}$  – Comprimento de encurvadura

Para o cálculo do comprimento efetivo de encurvadura, é necessário efetuar uma relação relativamente ao comprimento real, relação essa que depende de parâmetros como as condições de apoio da viga e o tipo de carregamento a que está sujeita, como se pode observar no Quadro 28.

Quadro 28 – Comprimento efetivo definido em proporção do vão, segundo o EC5

Condições de Apoio da Viga	Tipo de carregamento	$l_{ef}/l$
Simplesmente Apoiada	Momento Constante	1,0
	Carga uniformemente distribuída	0,9
	Carga concentrada a meio vão	0,8
Consola	Carga uniformemente distribuída	0,5
	Carga concentrada na extremidade livre	0,8

Logo, para a situação em estudo, viga simplesmente apoiada com carga uniformemente distribuída, temos:

$$\frac{l_{ef}}{l} = 0,9 \quad (35)$$

$$l_{ef} = 6 \times 0,9 = 5,4 \text{ metros}$$

Para o cálculo do valor característico do módulo de elasticidade, optou-se por utilizar a expressão definido no EC2 para o betão armado, considerando que o valor correspondente ao quantilho de 5% seria igual a 70% do valor médio.

Quadro 29 – Valores dos Módulos de Elasticidade obtidos experimentalmente

$E_{\text{ensaio}}$	$E_m$
4,02	3,813
3,75	
3,55	
3,93	

$$E_{0,05} = E_m \times 0,7 \quad (36)$$

$$E_{0,05} = 3,813 \times 0,7 = 2,6691 \text{ GPa}$$

Novamente a partir do valor médio, e tendo como base bibliográfica as “*Tabelas Técnicas*” (Farinha *et al.*), considera-se que o valor do módulo de distorção para madeira do tipo resinosas, pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$\text{Madeira resinosas} \rightarrow G = \frac{E_m}{16} \quad (37)$$

$$G = \frac{3,813}{16} = 0,2383 \text{ GPa}$$

Por fim, os parâmetros relativos às inércias, quer da viga em si, já calculado anteriormente, quer o momento de inércia torsional, valores apresentados nas expressões seguintes:

$$I_{viga} = \frac{0,21 \times 0,18^3}{12}$$

$$I_{viga} = 1,02 \times 10^{-4} \text{ m}^4$$

$$I_{tor} = \frac{b \times h}{3} \times (b^2 + h^2) \quad (38)$$

$$I_{tor} = \frac{0,21 \times 0,18}{3} \times (0,21^2 + 0,18^2)$$

$$I_{tor} = 9,64 \times 10^{-4} \text{ m}^4$$

Apresentados os cálculos intermédios, é então possível calcular o valor do momento crítico:

$$M_{crit} = \frac{\pi}{5,4} \times \sqrt{2,6691 \times 10^6 \times 1,02 \times 10^{-4} \times 9,64 \times 10^{-4} \times 0,2383 \times 10^6}$$

$$M_{crit} = 145,49 \text{ kNm}$$

Tal como efetuado nos subcapítulos anteriores, igualando o valor do momento fletor máximo para o qual a viga entra em bambeamento com a expressão do valor máximo de momento atuante, obtém-se o seguinte valor para a carga:

$$M_{Ed} = M_{crit} \quad (39)$$

$$M_{Ed} = q \times \frac{l_2^2}{8} = \frac{(P_{Ed} \times 0,64) \times 6^2}{8} = 145,49 \text{ kNm}$$

$$P_{Ed} = 50,52 \text{ kN/m}^2$$

#### 5.5.2.4 Deformação

Neste ponto serão abordadas as considerações relativas às deformações, quer instantânea quer final. Em primeiro lugar é importante referir o valor limite que as flechas podem apresentar, sendo que para o caso em estudo, viga sobre dois apoios, os valores limite de flecha são apresentados pelas seguintes expressões:

$$w_{ins} \leq \frac{l}{300} \quad e \quad w_{fin} \leq \frac{l}{150} \quad (40)$$

De acordo com o EC5, a flecha instantânea deve ser calculada para a combinação de ações características presente no EC0, utilizando os valores médios dos módulos de elasticidade e sendo calculada através da expressão:

$$w_{ins} \leq \frac{5}{384} \times \frac{q \times l^4}{EI} \quad (41)$$

Sendo que a carga  $q$ , deve ser considerada pela área de influência (afastamento entre vigas de 0,64 metros), logo temos:

$$q = P_{Ed} * 0,64 \quad (42)$$

Os restantes parâmetros como o valor médio do módulo de elasticidade,  $E$ , a inércia da viga,  $I$ , e o seu vão,  $l$ , são valores previamente apresentados.

$$E = 3,813 \text{ GPa}$$

$$l_{viga} = 6 \text{ metros}$$

$$I_{viga} = 1,02 \times 10^{-4} \text{ m}^4$$

O cálculo da deformação final,  $u_{fin}$ , é efetuado em função da deformação instantânea,  $u_{ins}$ , sendo esta afetada por um fator  $k_{def}$  que tem em conta o aumento da deformação ao longo do tempo em consequência do efeito combinado da carga e do teor de água.

$$u_{fin} = u_{ins} \times (1 + k_{def})$$

O valor do parâmetro  $k_{def}$ , para uma estrutura classificada com Classe de Serviço 2, como já referido anteriormente neste subcapítulo, e para madeira do tipo maciça, obtém-se um valor de  $k_{def} = 0,8$

A partir destas considerações obtemos:

$$u_{ins} = \frac{5}{384} \times \frac{(P_{Ed} \times 0,64) \times 6^4}{3,813 \times 10^6 \times 1,02 \times 10^{-4}}$$

Logo, igualando a expressão da flecha final ao seu limite máximo, obtemos a seguinte carga atuante:

$$u_{fin} = \frac{5}{384} \times \frac{(P_{Ed} \times 0,64) \times 6^4}{3,813 \times 10^6 \times 1,02 \times 10^{-4}} \times (1 + 0,8) \leq \frac{6}{150}$$

$$P_{Ed} \leq 0,80 \text{ kN/m}^2$$

#### 5.5.2.5 Vibração (Conjunto Soalho/Viga)

A vibração de um pavimento deve ser verificada de modo a garantir a existência de condições de conforto e segurança. A forma de garantir tal situação é controlar as vibrações induzidas pelos ocupantes das divisões, vibrações estas provocadas pelos passos das pessoas.

Para a situação em estudo, viga simplesmente apoiada com carga uniformemente distribuída, a frequência fundamental pode ser obtida pela expressão seguinte:

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \times l^2} \times \sqrt{\frac{(EI)_L}{m}} \quad (43)$$

em que:

$(EI)_L$  – Rigidez equivalente de flexão de placa do pavimento segundo um eixo perpendicular à direção das vigas, em  $Nm^2/m$ ;

$m$  – massa por unidade de área, em  $kg/m^2$

Para o cálculo da frequência fundamental, são necessários os seguintes dados:

$$l = 6 \text{ metros}$$

$$I_{viga} = 1,02 \times 10^{-4} \text{ m}^4$$

$$I_{tábua} = \frac{0,64 \times 0,026^3}{12} = 9,374 \times 10^{-7} \text{ m}^4$$

$$I_{conjunto} = 1,02 \times 10^{-4} + 9,374 \times 10^{-7}$$

$$I_{conjunto} = 1,029 \times 10^{-4} \text{ m}^4$$

$$E_m = 3,813 \text{ GPa}$$



Através dos dados iniciais dos provetes, é possível calcular a densidade média da madeira em estudo.

$$\gamma = \frac{\text{massa}}{\text{volume}} \quad (44)$$

$$\gamma = \frac{2,75}{0,3 \times 0,7 \times 0,026} = 503,6 \text{ kg/m}^3$$

Com os dados relativos à densidade média, e com as dimensões do conjunto viga/soalho, é possível calcular a massa do conjunto, através da expressão:

$$m_{(viga+soalho)} = \left( 0,026 + \frac{0,21 \times 0,18}{0,64} \right) \times 503,6 \quad (45)$$

$$m_{(viga+soalho)} = 42,84 \text{ kg/m}^2$$

Substituindo os dados obtidos na expressão geral da frequência fundamental obtém-se:

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \times 6^2} \times \sqrt{\frac{(3,813 \times 10^9 \times 1,029 \times 10^{-4})}{42,84}}$$

$$f_1 = 4,176 \text{ Hz}$$

É importante referir que para o caso de pavimentos, deverão ser obtidos valores de frequência superiores a 8 Hz,  $f_1 > 8\text{Hz}$ , sendo que para valores de  $f_1 \leq 8\text{Hz}$ , o EC5 define que os pavimentos deverão ser alvo de uma análise específica.

### 5.5.3 *Resumo*

Após ter sido efetuada a análise estrutural do pavimento em estudo, é possível concluir que quer o soalho quer as vigas não apresentam problemas a nível de verificações de segurança

aos estados limite últimos tendo, no entanto, sido obtidos valores inferiores aos ideais aquando do estudo das verificações de segurança aos estados limite de utilização.

A nível de estados limite últimos, o estudo do soalho forneceu valores de carga atuante máxima de 19,93 kN/m<sup>2</sup> pela verificação à flexão simples e de 80,07 kN/m<sup>2</sup> segundo a verificação ao corte, sendo que no caso das vigas os valores verificados foram de 2,86 kN/m<sup>2</sup> pela verificação à flexão simples e de 22,31 kN/m<sup>2</sup> segundo a verificação ao corte. O valor obtido na verificação à flexão simples das vigas implica algum cuidado pois comprovam que as vigas apresentam uma capacidade resistente reduzida.

Relativamente a estados limite de utilização verificaram-se valores perigosos para a estrutura, tendo sido obtido o valor de carga atuante máxima de 0,80 kN/m<sup>2</sup> no estudo da deformação das vigas e valores de frequência fundamental do conjunto soalho/viga de 4,176 Hz, valor inferior a 8 Hz que é o indicado pelo EC5 como sendo o valor mínimo preferencial, sendo portanto necessário efetuar estudos específicos ao pavimento em causa.

## 6 CONCLUSÃO

Neste capítulo apresentam-se as considerações finais do trabalho, tendo por base os principais resultados obtidos. Serão ainda expostas algumas das dificuldades que o trabalho com elementos de madeira envolve. Por fim, serão respondidas algumas questões que o dono de uma estrutura com elementos de madeira querera ver esclarecidas após pedir uma avaliação da estrutura.

Este trabalho abordou as metodologias de avaliação de segurança possíveis de aplicar em estruturas de madeira, focando-se essencialmente nas fases de inspeção e diagnóstico, referindo a grande variedade de patologias que podem afetar a madeira em geral bem como diversas técnicas de ensaio a utilizar para determinar o grau de afetação das propriedades físico-mecânicas em particular. Para tal, foram referidas algumas, das já várias, metodologias não destrutivas possíveis de aplicar assim como metodologias destrutivas, fornecedoras de dados essenciais mas nem sempre de execução possível. Torna-se cada vez mais notória a importância das fases de inspeção e diagnóstico, e a necessidade de as efetuar com o maior cuidado e rigor, fornecendo assim dados corretos e precisos para a etapa seguinte, a intervenção.

Para melhor compreender a etapa da intervenção, foram analisadas as verificações de segurança a efetuar a um pavimento de madeira, de acordo com o Eurocódigo 5. Realizou-se para tal o estudo de um caso real, determinando algumas das características físicas e definindo quais as verificações mais condicionantes para o pavimento estudado.

As amostras de soalho, foram submetidos a vários ensaios, cujos resultados vieram a comprovar as informações obtidas através da inspeção visual, que apontava para provetes com elevado grau de ataque por parte de agentes bióticos e a provável redução da capacidade resistente dos mesmos. Após ensaios com o Higrómetro e o Pilodyn obtiveram-se valores

acima dos ideais, tendo mesmo alguns provetes atingido valores que podem representar perigo para a estrutura. Relativamente ao ensaio à flexão, resultou em valores de módulos de elasticidade e de resistência à flexão inferiores ao esperado em elementos de madeira natural, por exemplo, tendo como base a espécie Pinho Bravo e algumas publicações de referência. Apesar da elevada heterogeneidade da madeira e da nuvem de dispersão de valores possíveis de obter, o valor do módulo de elasticidade de madeira são situa-se normalmente entre os 8 e os 14 GPa, tendo o valor médio obtido nas amostras estudadas sido de 3,81 GPa.

Por fim, foram extraídos provetes de pequenas dimensões com o objetivo de calcular o módulo de elasticidade da madeira através do uso do Grindosonic, tendo esses valores ficado aquém daquilo que seria ideal, tendo no entanto sido obtidos valores ligeiramente superiores aos obtidos através do ensaio à flexão. É importante referir alguns fatores que podem condicionar os resultados obtidos, nomeadamente a pouca variedade de amostras devido à dificuldade de analisar laboratorialmente estruturas existentes, e a qualidade dos provetes de pequenas dimensões, extraídos a partir das tábuas de soalho, e que se encontravam amplamente atacados por agentes bióticos, mais especificamente, caruncho.

Com os dados obtidos, foi efetuada uma análise estrutural ao pavimento, tendo sido estudado tanto o soalho como as vigas. Para tal, efetuaram-se relações entre as capacidades resistentes obtidas experimentalmente e a situação de carga esperada, chegando assim a valores de carga atuante máxima para cada uma das verificações estabelecidas pelo EC5. Pode-se então concluir que para situações de elementos degradados como a que se verificou, a nível de soalho torna-se condicionante a verificação à flexão do mesmo enquanto no caso das vigas, as condições que se demonstraram mais condicionantes foram os Estado Limite de Utilização, a deformação e a vibração. De referir que no caso da deformação final, de modo a cumprir os limites máximos, o pavimento só poderia estar sujeito a uma carga de

0,80 kN/m<sup>2</sup>, enquanto no parâmetro vibração, o conjunto soalho/viga não atingiu sequer o valor mínimo de frequência fundamental preferencial de 8Hz, de acordo com o EC5.

Para concluir, e em resposta às questões expostas no Capítulo 1, serão referidos os seguintes tópicos:

- Relativamente ao estado de conservação do pavimento, este apresenta-se bastante degradado, com visível ataque por parte de caruncho e problemas de exposição a agentes atmosféricos o que explica os valores de teor em água próximos dos 20% em algumas zonas do pavimento;
- Relativamente à questão da resistência, é necessário terem-se alguns cuidados durante o tratamento dos dados obtidos. Em estruturas existentes e com vários anos de vida útil, é normal encontrar-se aspetos que dificultam a definição da sua capacidade resistente sendo eles, inexistência de regulamentação aquando da construção, a irregularidade das secções dos materiais utilizados e os problemas inerentes a elementos naturais, entre outros. Tendo em conta os resultados de capacidades resistentes obtidos, pode-se afirmar que este pavimento não apresenta problemas a nível de verificação da segurança aos estados limite últimos, tendo apenas sido verificado valores relativamente baixos durante o estudo das vigas à flexão simples. No entanto verificou-se que o pavimento apresenta problemas a nível de verificação da segurança aos estados limites de utilização, sendo prudente a realização de um estudo mais detalhado consoante o uso a ser dado à estrutura;
- Por fim, e tendo em conta a possível ou não utilização do pavimento referido, considera-se que a sua utilização não é passível de perigo neste momento, devendo no entanto serem tomadas medidas de contenção e reparação dos danos observados, não sendo possível sujeitar a estrutura a esforços elevados pelo menos até ser efetuada alguma ação de melhoramento das condições da mesma. Importa referir que o

proprietário do edifício estudado já tinha tomado medidas preventivas de segurança, encontrando-se o pavimento interdito ao público.

## 7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida J.F.C.D., 2009. Estudo de soluções estruturais para reabilitação de edifícios em alvenaria de pedra. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 126 pp. (Dissertação de Mestrado)

Appleton J., 2010. Reabilitação de Edifícios Antigos e Sustentabilidade. VI Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Civil – ENEEC, 2010, 65 pp.

Arriaga F., Reraza F., Bobadilla M.E.I. & García F., 2002. Intervencione n estruturas de madera. 1<sup>st</sup> Edition. AiTiM. 464 pp.

ASTM – American Society for Testing and Materials, 2005. Standart Test Method for Dynamic Young’s Modulus, Shear Modulus, and Poisson’s Ratio by Impulse Excitation of Vibration, E 1876–01. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 18 pp.

Botelho J., 2006. Avaliação não destrutiva da capacidade resistente de estruturas de madeira de edifícios antigos. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. (Dissertação de Mestrado).

Branco J.. Estruturas de Madeira versão 1. Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade do Minho. 55 pp.

Branco J.M., 2012. Análise e reforço de coberturas tradicionais. Seminário Coberturas de Madeira, 2012, 16 pp.

Braz R.F., 2012. Ligações para madeira: segurança e rentabilidade. Instituto Superior de Engenharia do Porto. 78 pp.

Brites R.D., Machado J.S. & Lourenço P.B., 2010. Avaliação da propriedades mecânicas da madeira *in situ* por ensaios de mesoprovets. 8º Congresso Nacional de Mecânica Experimental, 2010, 7 pp.

Brites R.J.D.S., 2011. Avaliação de Segurança das Estruturas Antigas de Madeira. Escola de Engenharia da Universidade do Minho. 160 pp. (Dissertação de Doutoramento).

Correia E.A.S., 2009. Análise e Dimensionamento de Estruturas de Madeira. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 163 pp. (Dissertação de Mestrado).

Coop Agriforest s.c., 2011. Imagem de um perfil *Registograph*. In: <http://www.agriforest.org/> (consultado em 19 de Junho de 2013).



Costa A., Guedes J., Paupério E., Ilharco T. & Ornelas C., 2006. Relatório de Inspeção e Diagnóstico da casa do Marquês de Pombal n.º44. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Costa A.A., 2012. Apontamentos versão 0.0 da disciplina Estruturas de Madeira e Alvenaria do Mestrado de Engenharia Civil, ramo de Estruturas. Instituto Superior de Engenharia do Porto. 69 pp.

Costa F.P., 1955. Enciclopédia prática da Construção Civil. F. Pereira da Costa – Portugal Editora, Lisboa.

Cruz H., 2011. Inspeção, avaliação e conservação de estruturas de madeira. 1<sup>as</sup> Jornadas de Materiais na Construção, 2011, pp. 215-227.

Cruz H., 2012. Patologias e reabilitação de estruturas de madeira. Inspeção a linguagem das anomalias. LNEC. 13 pp.

Cruz H., Machado S., Rodrigues M. & Monteiro G.. Pinho bravo para estruturas. LNEC, 12 pp.

DEC-FCT-UNL – Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2013. Características da madeira maciça (pinho bravo) In: [http://www2.dec.fct.unl.pt/seccoes/S\\_Estruturas/Dinamica/TRABALHO\\_PRATICO/ProprMadeira.html](http://www2.dec.fct.unl.pt/seccoes/S_Estruturas/Dinamica/TRABALHO_PRATICO/ProprMadeira.html) (consultado em 2 de Setembro de 2013).

Dias A., Cruz H., Machado J.S., Custódio J.E.P. & Palma P.M.C, 2009. Avaliação, Conservação e Reforço de Estruturas de Madeira. 1ª Edição. Dashöfer Holding Ltd. e Verlag Dashöfer, Edições Profissionais Sociedade Unipessoal, Lda.. 154 pp.

Dias T.I.M.P., 2008. Pavimento de madeira em edifícios antigo. Diagnóstico e intervenção estrutural. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 314 pp. (Dissertação de Mestrado).

EC0 – Eurocódigo 0, 2009. Bases para o projecto de Estruturas. Instituto Português da Qualidade. 88 pp.

EC1 – Eurocódigo 1, 2009. Acções em Estruturas - Parte 1-1: Acções gerais. Instituto Português da Qualidade. 47 pp.

EC2 – Eurocódigo 2, 2010. Projecto de Estruturas de Betão - Parte 1: Regras gerais e regras para edifícios. Instituto Português da Qualidade. 259 pp.

EC5 – Eurocode 5, 2003. Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings. CEN. 123 pp.

EN 384, 2004. Structural Timber – Determination of characteristic values of mechanical properties and density. CEN.

EN 408, 1995. Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties. CEN. 23 pp.

Farinha J.S.B. & Reis A.C., 1993. Tabelas Técnicas. Edição 1993. Edição P.O.B., Setúbal. 633 pp.

Feio A. & Rebelo N., 2006a. Reabilitação de estruturas de madeira. Diagnóstico e inspeção (parte 1). Engenharia e vida.

Feio A. & Rebelo N., 2006b. Reabilitação de estruturas de madeira. Diagnóstico e inspeção (parte 2). Engenharia e vida.

Feio A. & Rebelo N., 2006c. Reabilitação de estruturas de madeira. Diagnóstico e inspeção (parte 3). Engenharia e vida.

Feio A. & Rebelo N., 2007. Reabilitação de estruturas de madeira. Diagnóstico e inspeção (parte 4). Engenharia e vida.

Feio A.J.O., 2005. Inspeção e Diagnóstico de Estruturas Históricas de Madeira: Correlações com Métodos Não Destrutivos e Comportamento Estrutural. Escola de Engenharia da Universidade do Minho. 219 pp. (Tese de Doutoramento).

Félix C., 2010. Apontamentos da disciplina Estruturas de Betão Armado da Licenciatura em Engenharia Civil, Capítulo 2. Instituto Superior de Engenharia do Porto. 30 pp.

Fiorelli J., 2002. Utilização de fibras de carbono e de fibras de vidro para reforço de vigas de madeira. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 168 pp. (Dissertação de Mestrado).

Franco S.I.S., 2008. Proposta de Atribuição de Propriedades Mecânicas a Elementos Estruturais de Madeira por Inspeção Visual *in situ*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 146 pp. (Dissertação de Mestrado).

Guimarães A.S., Costa A., Arêde A., Carvalho A.P.O., Begonha A., Medeiros C., Paupério E., Barreira E., Corvacho H., Sousa H., Porto J.L., Guedes J.M., Teixeira J., Faria J.A.,

Quintela M.A., Ramos N., Valentim N., Póvoas R.F. & Freitas V.P., 2012. Manual de apoio ao projecto de reabilitação de edifícios antigos. 1ª Edição. Ordem dos Engenheiros Região Norte. 300 pp.

GrindoSonic, 2013. Procedimentos de Ensaio. In: <http://www.grindosonic.com/en/> (consultado em 20 de Junho de 2013).

Ilharco T., 2013. Curso Avaliação e Reabilitação de Estruturas de Alvenaria e Madeira. Formação FIPP em parceria com o Departamento de Engenharia Civil do ISEP.

IML-RESI, B-Series, 2008. Manual. Instrumenta Mechanik Labor System GmbH, Germany. 67 pp.

Júnior J.A.B., 2006. Avaliação não destrutiva da capacidade resistente de estruturas de madeira e edifícios antigos. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 208 pp. (Dissertação de Mestrado).

Lima J.T., Sartório R.C., Trugilho P.F., Cruz C.R. & Vieira R.S., 2007. Uso do resistógrafo para estimar a densidade básica e a resistência à perfuração da madeira de *Eucalyptus*. Scientia Forestalis, 75, pp. 85-93.

Lopes D.B., 2006. Apresentação do Curso de Estruturas em Madeira da disciplina de Conservação e Reabilitação de Edifícios do Mestrado de Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Lopes D.B, Militz H. & Mai C., 2010. Pilodyn Testing of Thermally and Chemically Modified Wood. 50<sup>th</sup> European Conference on Wood Modification, 2010, 7 pp.

Lopes M.A.C., 2007. Tipificação de Soluções de Reabilitação de Estruturas de Madeira em Coberturas de Edifícios Antigos. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 188 pp. (Dissertação de Mestrado).

Lousada J., Noronha M., Lopes D. & Silva M., 2008. Relações entre Peso, Volume e Densidade para a Madeira de Pinheiro Bravo (*Pinus pinaster Ait.*) Cultivado em Portugal. Silva Lusitana, 16 (2), pp 183-196.

Louzada J.L., Gaspar M.J. & Bento E.M. Uso do *Pilodyn* para a estimativa da densidade da madeira de *Eucalyptus Nitens*. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Depto. Florestal. 6pp.

Machado J.S., Cruz H. & Nunes L., 2000. Inspeção de elementos estruturais de madeira. Selecção das técnicas não destrutivas a aplicar *in situ*. Encontro Nacional Sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas, Lisboa.

Martina S.F.M.F., 2009. Estruturas de Madeira – Inspeção e Diagnóstico. Aplicação em Caso de Estudo. Escola de Engenharia da Universidade do Minho. 244 pp. (Dissertação de Mestrado).

Martins T.F.R.M.M., 2010. Dimensionamento de Estruturas em Madeira: Coberturas e Pavimentos. Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa. 151 pp. (Dissertação de Mestrado).

Mendes P.M.F.C., 1994. Ligações em estruturas de madeira: tecnologia e dimensionamento de acordo com o Eurocódigo 5. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 147 pp. (Dissertação de Mestrado).

Metalica, 1999. Tipos de Telhados. In: <http://www.metalica.com.br/coberturas-os-diversos-tipos-e-suas-caracteristicas> (consultado em 8 de Abril de 2013).

Molina J.C., Junior C.C., Freitas R.R. & Ferro F.S., 2010. Avaliação não destrutiva da deterioração de postes roliços de madeira através da utilização do resistógrafo. Madeira Arquitetura & Engenharia, v 11, n 27, pp. 15-23.

Moutinho C., Cunha Á. & Caetano E., 2010. Redução dos níveis de vibração em pavimentos de edifícios utilizando amortecedores de massas sintonizadas. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 10 pp.

NCREP – Consultoria e Reabilitação do Edificado e Património, 2012. Conhecer para reabilitar. RECONSTRUIR, 6, pp. 4-6.

NP EN 206-1, 2007. Especificação, desempenho, produção e conformidade. Instituto Português da Qualidade. 49 pp.

NP EN 310, 2000. Placas de derivados de madeira, Determinação do módulo de elasticidade em flexão e da resistência à flexão. Instituto Português da Qualidade. 12 pp.

NP EN 335-1, 1994. Durabilidade da madeira e de produtos derivados: Definição das classes de risco de ataque biológico. Parte 1: Generalidades. Instituto Português da Qualidade. 10 pp.

NP EN 335-2, 1994. Durabilidade da madeira e de produtos derivados: Definição das classes de risco de ataque biológico. Parte 2: Aplicação à madeira maciça. Instituto Português da Qualidade. 12 pp.



NP EN 338, 2001. Madeira para estruturas, Classes de resistência. Instituto Português da Qualidade. 10 pp.

NP EN 460, 1995. Durabilidade da madeira e de produtos derivados: Durabilidade natural da madeira maciça. Guia de exigências de durabilidade das madeiras na sua utilização segundo as classes de risco. Instituto Português da Qualidade. 12 pp.

NP 180, 1962. Anomalias e defeitos da madeira. Instituto Português da Qualidade.

NP 614, 1973. Madeiras. Ensaio de teor em água. Instituto Português da Qualidade.

NP 616, 1973. Madeiras. Ensaio da massa volúmica. Instituto Português da Qualidade.

NP 618, 1973. Madeiras. Ensaio de compressão axial. Instituto Português da Qualidade.

NP 619, 1973. Madeiras. Ensaio de flexão estático. Instituto Português da Qualidade.

NP 620, 1973. Madeiras. Ensaio de flexão dinâmica. Instituto Português da Qualidade.

NP 621, 1973. Madeiras. Ensaio de tração transversal. Instituto Português da Qualidade.

NP 622, 1973. Madeiras. Ensaio de fendimento. Instituto Português da Qualidade.

NP 623, 1973. Madeiras. Ensaio de corte. Instituto Português da Qualidade.

NP 4305, 1995. Madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas, Classificação visual. Instituto Português da Qualidade. 10 pp.

Otani L.B., Segundinho P.G.A. & Pereira A.H.A., 2013. Caracterização dos módulos elásticos de madeiras e derivados utilizando a técnica de excitação por impulso. Universidade Federal de Espírito Santo. 24 pp.

Rodrigues L.F., 2011. Eficiência de *pilodyn* para a seleção de materiais genéticos de eucalipto para fins energéticos. Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 30 pp. (Monografia)

Rodríguez J.A.V., 2011. Patología y recuperación de estructuras de madera: Intervención en estructuras de madera. 52 pp.

RSAEEP – Regulamento de Segurança e Acção para Estruturas de Edifícios e Pontes, 1983.

Segurado J.E.S., 1942. Trabalhos de carpintaria Civil. Biblioteca de Instrução Profissional, Livraria Bertrand, Lisboa.

Sogrape Vinhos, SA., 2013. Empresa Produtora de Vinho. In: <http://www.sograpevinhos.eu/> (consultado em 4 de Abril de 2013).

Teixeira J.J.L., 2004. Descrição do Sistema Construtivo da casa Burguesa do Porto entre os séculos XII e XIX. Contributo para uma história da construção arquitectónica em Portugal, Provas de aptidão pedagógica e capacidade científica. FAUP, Porto.

Valle Â., Brites R.D. & Lourenço P.B, 2006. Uso da perfuração controlada na avaliação de degradação da madeira em edificações antigas – estudo de caso. Anais do 10º Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira – EBRAMEM, 2006, 15 pp.

Zoreta L.C., 1986. Curso de Mecânica y tecnologia de los edificios antiguos, Colégio Oficial Arquitectos Madrid (COAM), Madrid.



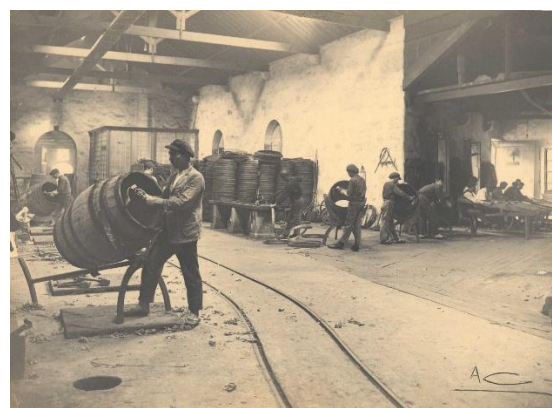
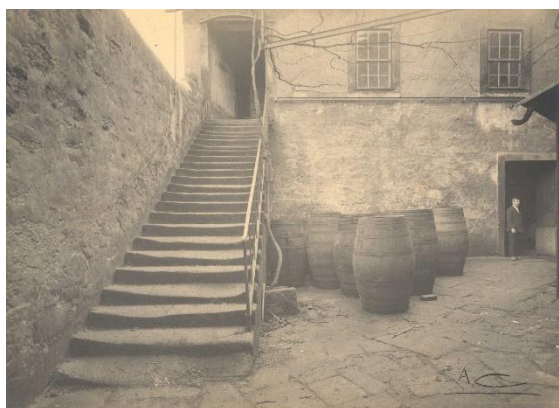
## ANEXO I



## ANEXO I.1 – Levantamento Histórico

### (Fotografias)

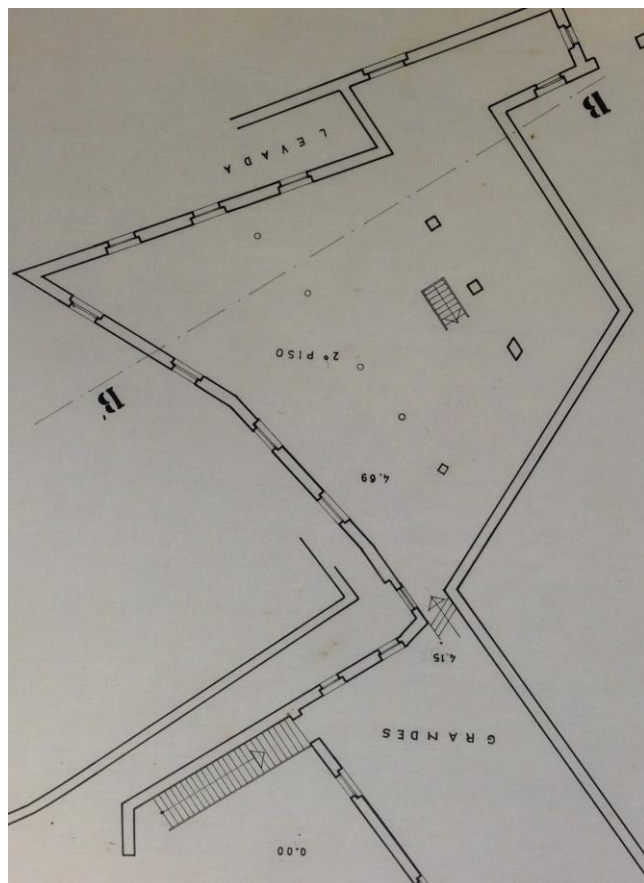
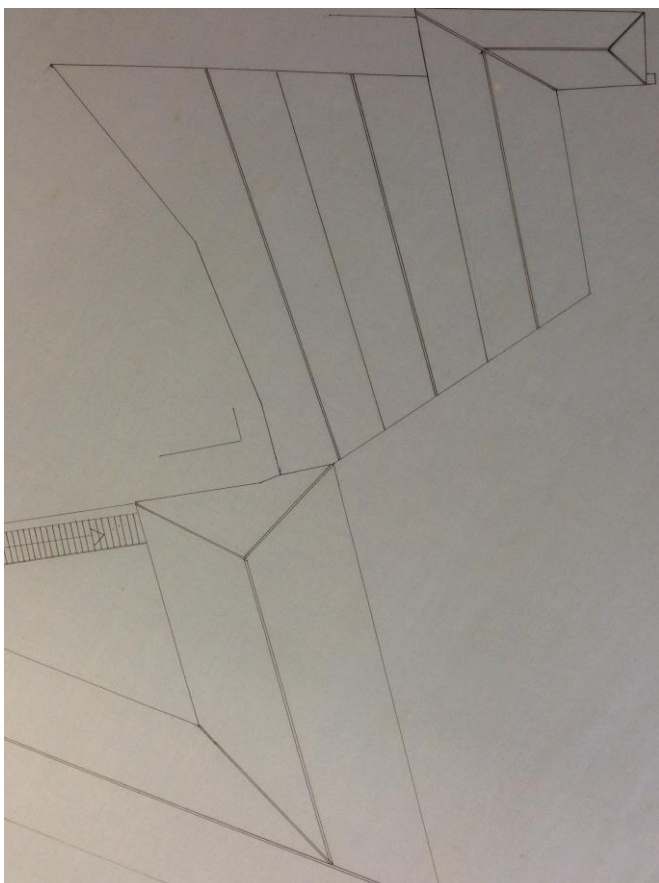
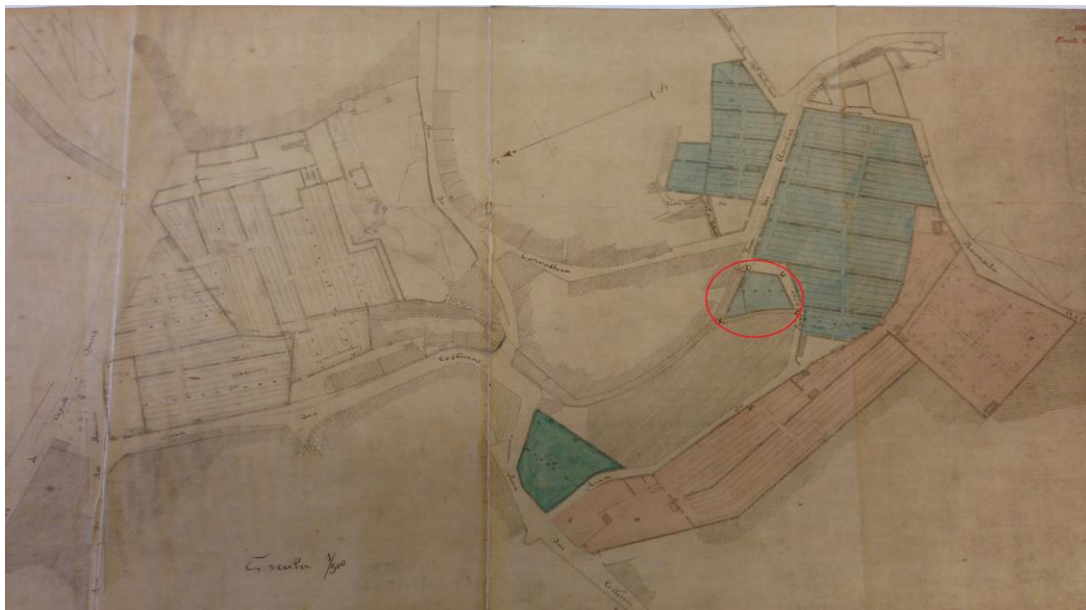
(Fonte: Sogrape, S.A.)



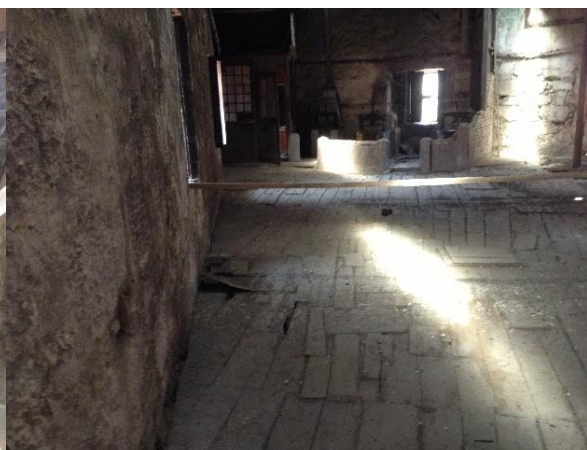


## ANEXO I.2 – Descrição Estrutural da sala

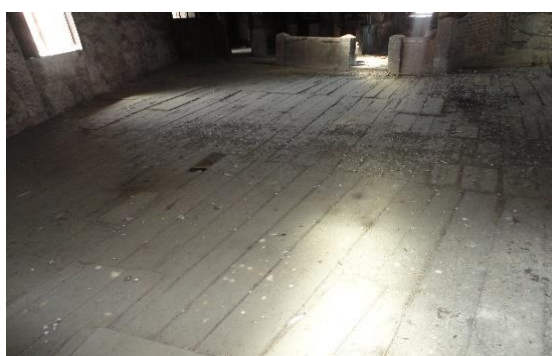
Plantas Arquitetônicas Antigas (Fonte: Sogrape, S.A.)



### Vista geral da Sala



### Soalho





## Cobertura - Asnas

Asna A1 - Simples



Asna A2 - Simples



Asna A3 - Palladio



Asna A4 - Palladio



Asna A5 - Palladio



Asna A6 - Palladio



Asna A7 - Palladio



Asna A8 - Palladio





Asna A9 - Palladio



Asna A10 - Palladio



Asna A11 - Palladio



Asna A12 - Palladio



Asna A13 - Palladio



## Pavimento - Vigas



Dados:

	Altura (cm)	Largura (cm)	Comprimento (cm)		Afastamento entre vigas (cm)
<b>V1</b>	18	20	600	<b>V1/V2</b>	27
<b>V2</b>	17	25	600	<b>V2/V3</b>	43
<b>V3</b>	18	21	600	<b>V3/V4</b>	22
<b>V4</b>	19	21	600	<b>V4/V5</b>	41
<b>V5</b>	14	17	600	<b>V5/V6</b>	31
<b>V6</b>	20	21	600		

	Valores Médios (cm)		
	Altura	Largura	Comprimento
<b>Viga Padrão</b>	18	21	600

## Pilares

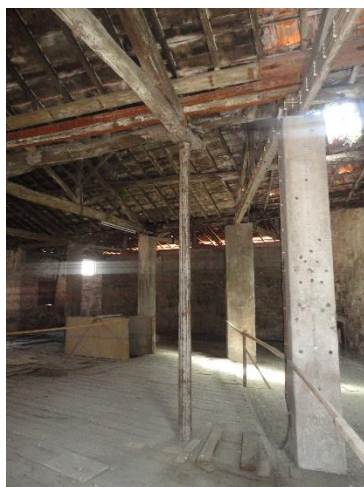
Pilar 1



Pilar 2



Pilar 3



Pilar 4





Pilar 5



Pilar 6



Pilar 7



Pilar 8



Dados:

	Dimensões (m)		
	a	b	
<b>P1</b>	0,42	0,42	Betão
<b>P2</b>	0,73	0,76	Betão
<b>P3</b>	$\phi=0,14$		Metálico
<b>P4</b>	$\phi=0,14$		Metálico
<b>P5</b>	0,42	0,42	Betão
<b>P6</b>	$\phi=0,14$		Metálico
<b>P7</b>	0,42	0,42	Betão
<b>P8</b>	$\phi=0,14$		Metálico

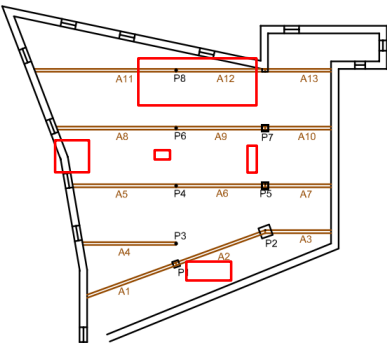




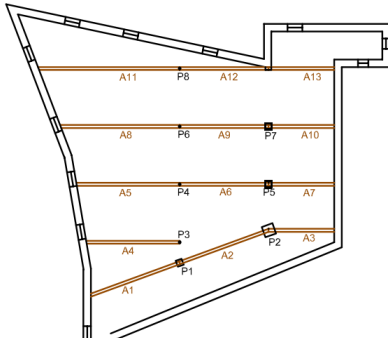

## ANEXO II

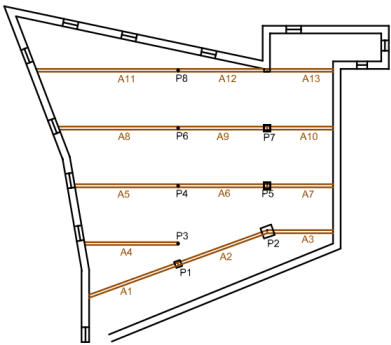



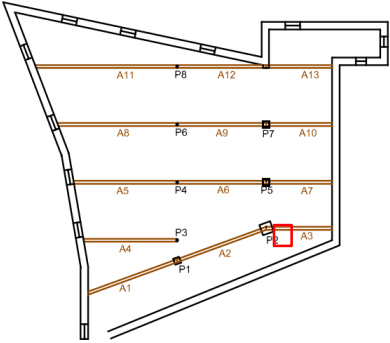

## ANEXO II.1 – Mapas de Danos

Mapa de Danos 01	
<b>Tipo de dano:</b> Rotura da cobertura	
<b>Localização dos danos:</b>	<b>Elementos estruturais:</b>
	Forro do telhado
	<b>Registo fotográfico:</b>
<b>Descrição:</b>	
<b>Possíveis Causas:</b>	
<p>Falta de manutenção da estrutura da cobertura;</p> <p>Inexistência do forro da cobertura, facilitando assim a rotura e queda das telhas.</p>	

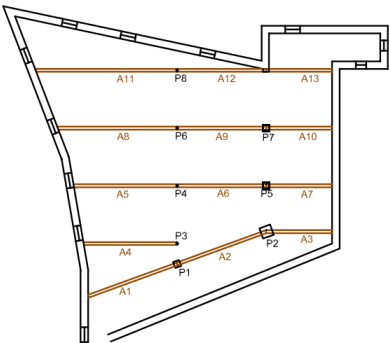

Mapa de Danos 02	
<b>Tipo de dano:</b> Rotura do pavimento	
<b>Localização dos danos:</b>	<b>Elementos estruturais:</b>
	Pavimento
	<b>Registo fotográfico:</b>
<b>Descrição:</b>	
Rotura do pavimento.	
<b>Possíveis Causas:</b>	
<p>Água da chuva proveniente das roturas da cobertura e a conjugação desta ação com a exposição à luz solar, originando ciclos de humedificação/secagem e levando ao desgaste das peças;</p> <p>Podridão</p>	

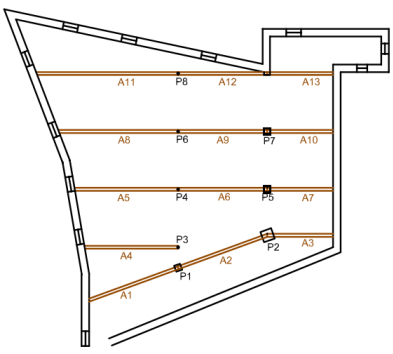



Mapa de Danos 03	
Tipo de dano: Humidade	
Localização dos danos:	Elementos estruturais:
	Cobertura e pavimento
	Registo fotográfico:
Descrição:	
Identificou-se a presença de humidade generalizada na cobertura e pavimento.	
Possíveis Causas:	
Ineficácia do sistema de drenagem de águas pluviais;  Penetração de água da chuva devido à perda de argamassa nas juntas e devido às roturas existentes na cobertura.	

Mapa de Danos 04	
Tipo de dano: Podridão	
Localização dos danos:	Elementos estruturais:
	Cobertura e pavimento
	Registo fotográfico:
	
Descrição:	
Identificou-se a presença de podridão e bolor em alguns elementos estruturais da cobertura e do pavimento.	
Possíveis Causas:	
Humidade	

Mapa de Danos 05	
<b>Tipo de dano:</b> Vegetação	
<b>Localização dos danos:</b>	<b>Elementos estruturais:</b>
	Cobertura
	<b>Registo fotográfico:</b>
<b>Descrição:</b>  Identificou-se a presença de vegetação e dejetos na cobertura acelerando assim a degradação da cobertura. Esta pode causar a rotura dos materiais e a criação de fendas através da introdução de ações mecânicas pela penetração das raízes.	
<b>Possíveis Causas:</b>  Entrada de humidade, excrementos de pássaros e depósitos de terras que atuam como fertilizantes	



Mapa de Danos 06	
Tipo de dano: Fendas	
Localização dos danos:	Elementos estruturais:
	Cobertura e pavimento
	Registo fotográfico:
<p><b>Descrição:</b></p> <p>Identificou-se várias fendas nos elementos estruturais de madeira da cobertura e do pavimento.</p>	
<p><b>Possíveis Causas:</b></p> <p>As fendas são um fenómeno de ocorrência natural na madeira agravando-se com o envelhecimento da mesma. As amplitudes higrotérmicas a que a madeira está sujeita é também um fator que proporciona o aparecimento das fendas.</p>	

Mapa de Danos 07	
<b>Tipo de dano:</b> Ataques de insetos xilófagos	
<b>Localização dos danos:</b>	<b>Elementos estruturais:</b>
	Pavimento
	<b>Registo fotográfico:</b>
<b>Descrição:</b>	  
<p>Presença de ataques por insetos xilófagos, nomeadamente caruncho, identificado através dos orifícios existentes nas tábuas de soalho e presença do serrim característico deste mesmo dano. Não foi possível verificar a profundidade dos danos devido à insegurança do pavimento.</p>	
<b>Possíveis Causas:</b>	
<p>Presença de humidade;</p> <p>Envelhecimento natural;</p> <p>Ausência de manutenção e de tratamento preservador de madeiras.</p>	

## ANEXO II.2 – Dados de amostras e provetes

- Amostras

P01/P02; P03/P04

Localização das Amostras



P05/P06; P07/P08; P11/P12

Localização das Amostras



Dados:

	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Espessura (mm)	Peso (g)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
<b>P02</b>	300	685	26	2750	0.51
<b>P03</b>	297	730	27	3220	0.55
<b>P05</b>	185	910	35	2123	0.36
<b>P08</b>	180	918	33	2610	0.48
<b>P12</b>	175	1210	32	3165	0.47

- **Provetes extraídos**

P02-1



P02-2



P03-1



P03-2



P05-1



P05-2



P08-1



P08-2



P12-1



P12-2

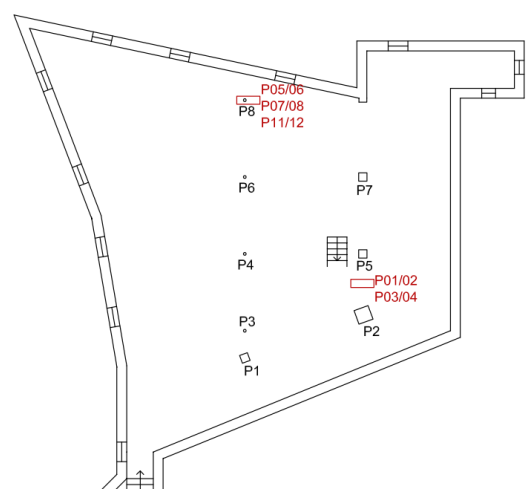




Dados:

	Comprimento (mm)	Secção da base (mm)	Peso (g)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
P02 - 1	300	(15x15)	30	0.44
P02 - 2	300	(15x15)	30	0.44
P03 - 1	300	(15x15)	30	0.44
P03 - 2	300	(15x15)	30	0.44
P05 - 1	400	(25x25)	110	0.44
P05 - 2	400	(25x25)	110	0.44
P08 - 1	400	(25x25)	125	0.50
P08 - 2	400	(25x25)	105	0.42
P12 - 1	400	(25x25)	115	0.46
P12 - 2	400	(25x25)	120	0.48

Localização em Planta das Amostras Ensaçadas



## ANEXO II.3 – Resultados obtidos

- Teor em Água

	Medições (%)			Valor Médio (%)
	E	C	D	
<b>P01</b>	12.00	11.60	11.40	11.67
<b>P02</b>	11.30	12.10	11.20	11.53
<b>P03</b>	12.70	11.80	11.90	12.13
<b>P04</b>	11.60	11.40	11.10	11.37
<b>P05</b>	12.40	13.40	14.00	13.27
<b>P06</b>	12.40	12.60	12.40	12.47
<b>P07</b>	11.40	10.30	18.40	13.37
<b>P08</b>	10.70	11.40	16.30	12.80
<b>P11</b>	15.50	16.00	14.20	15.23
<b>P12</b>	11.70	10.70	11.50	11.30

- Pilodyn

	Medições (mm)						Média (mm)		Densidade (kg/m³)	
	Esquerda			Direita			Esq.	Dir.		
<b>P01</b>	15	15	17	12	12	16	15.67	13.33	356.15	501.98
<b>P02</b>	12	13	14	16	14	12	13.00	14.00	522.81	460.31
<b>P03</b>	11	10	17	14	14	13	12.67	13.67	543.65	481.15
<b>P04</b>	13	13	13	14	14	10	13.00	12.67	522.81	543.65
<b>P05</b>	22	16	22	21	18	16	20.00	18.33	85.31	189.48
<b>P06</b>	21	19	15	20	18	19	18.33	19.00	189.48	147.81
<b>P07</b>	16	8	12	15	12	18	12.00	15.00	585.31	397.81
<b>P08</b>	8	18	7	10	17	13	11.00	13.33	647.81	501.98
<b>P11</b>	18	13	20	17	14	16	17.00	15.67	272.81	356.15
<b>P12</b>	15	19	14	20	15	13	16.00	16.00	335.31	335.31

- Grindosonic (Amostras)

Escolha do Martelo

	Valores de frequência (Hz)				
<b>M2P2-H1</b>	562.70	553.00	1240.00	1399.00	1499.00
<b>M2P2-H2</b>	1396.00	1295.00	1420.00	1089.00	1126.00
<b>M2P2-H3</b>	1634.00	1246.00	1210.00	1210.00	1274.00
<b>M2P2-H4</b>	342.00	437.20	1471.00	914.60	325.80



Amostra P02

		Valores de frequência (Hz) - P02				
Martelo 3	M1P1	762.00	714.00	876.00	885.00	774.00
	M1P2	961.00	958.00	950.00	960.00	958.00
	M1P3	1411.00	1773.00	2000.00	1375.00	814.50
	M2P1	1294.00	1081.00	952.70	1081.00	1134.00
	M2P2	1049.00	1166.00	1298.00	1129.00	1355.00
	M2P3	1043.00	829.40	1406.00	1008.00	1426.00
	M3P1	1294.00	881.20	976.20	881.50	806.80
	M3P2	875.00	1053.00	1075.00	912.00	1137.00
	M3P3	1111.00	1115.00	851.00	1108.00	1105.00

- Grindosonic (Provete extraídos)

		Valores de frequência (Hz)			
P02 - 1		512.2	512.6	512.8	516.3
P02 - 2		686.10	685.80	687.40	685.20
P03 - 1		608.70	606.30	607.80	605.40
P03 - 2		545.80	569.70	590.40	539.60
P05 - 1		587.40	593.80	591.40	579.80
P05 - 2		517.30	518.80	525.30	518.40
P08 - 1		599.00	593.30	584.30	595.90
P08 - 2		575.20	577.40	576.60	577.20
P12 - 1		672.20	665.90	663.60	661.10
P12 - 2		421.20	433.00	421.40	421.60

		Valores médios de frequência (Hz)
P02 - 1		513.48
P02 - 2		686.13
P03 - 1		607.05
P03 - 2		561.38
P05 - 1		588.10
P05 - 2		519.95
P08 - 1		593.13
P08 - 2		576.60
P12 - 1		665.70
P12 - 2		424.30

	MOE dyn (Gpa)
P02 - 1	4.06
P02 - 2	7.26
P03 - 1	5.68
P03 - 2	4.86
P05 - 1	6.04
P05 - 2	4.73
P08 - 1	6.98
P08 - 2	5.55
P12 - 1	8.11
P12 - 2	3.43

- Comparação  $MOE_{dyn}/MOE_{rot}$

	MOE (dyn) (Gpa)	MOE (rotura) (Gpa)
P02 - 1	5.66	4.02
P02 - 2		
P03 - 1	5.27	3.75
P03 - 2		
P05 - 1	5.39	3.55
P05 - 2		
P08 - 1	6.27	3.93
P08 - 2		
P12 - 1	5.77	
P12 - 2		

## Folhas de cálculo Utilizadas ( $MOE_{dyn}$ )

MOEdin\_1.xls [Modo de Compatibilidade] - Excel

FICHEIRO BASE INSERIR ESQUEMA DE PÁGINA FÓRMULAS DADOS REVER VER

João Cunha

Área de Transferência Tipo de Letra Alinhamento Número

Formatação Condicional Formatar como Tabela Estilos de Célula Inserir Eliminar Formatar Células

Soma Automática Preenchimento Limpar Ordenar e Localizar e Filtrar Selecionar Edição

S7 =Q7/P7/Q7/R7\*1000000

	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
	Zeit (Wochen)	Grindsonic (m sec)	Frequência (kHz)	Massa (g)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Densidade (kg/m³)	Inércia (mm⁴)			dyn. MOE (N/mm²)	Atro [g]	Mass loss [%]	
1															
2															
3															
4															
5															
6															
7			0.513	30	300.00	15.00	15	444.4444444	4218.75			4060.5			
8			0.686	30	300.00	15.00	15	444.4444444	4218.75			7261.0			
9			0.607	30	300.00	15.00	15	444.4444444	4218.75			5684.9			
10			0.561	30	300.00	15.00	15	444.4444444	4218.75			4855.9			
11			0.588	110	400.00	25.00	25	440	32552.08333			6043.4			
12			0.52	110	400.00	25.00	25	440	32552.08333			4726.4			
13			0.593	125	400.00	25.00	25	500	32552.08333			6984.8			
14			0.577	105	400.00	25.00	25	420	32552.08333			5554.9			
15			0.666	115	400.00	25.00	25	460	32552.08333			8105.5			
16			0.424	120	400.00	25.00	25	480	32552.08333			3428.0			

Página 3

Página 4

Página 5

MOEdin\_1.xls [Modo de Compatibilidade] - Excel

FICHEIRO BASE INSERIR ESQUEMA DE PÁGINA FÓRMULAS DADOS REVER VER

João Cunha

Área de Transferência Tipo de Letra Alinhamento Número

Formatação Condicional Formatar como Tabela Estilos de Célula Inserir Eliminar Formatar Células

Soma Automática Preenchimento Limpar Ordenar e Localizar e Filtrar Selecionar Edição

T7 =Q7\*R7^3/12

	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
	Zeit (Wochen)	Grindsonic (m sec)	Frequência (kHz)	Massa (g)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Densidade (kg/m³)	Inércia (mm⁴)			dyn. MOE (N/mm²)	Atro [g]	Mass loss [%]	
1															
2															
3															
4															
5															
6															
7			0.513	30	300.00	15.00	15	444.4444444	4218.75			4060.5			
8			0.686	30	300.00	15.00	15	444.4444444	4218.75			7261.0			
9			0.607	30	300.00	15.00	15	444.4444444	4218.75			5684.9			
10			0.561	30	300.00	15.00	15	444.4444444	4218.75			4855.9			
11			0.588	110	400.00	25.00	25	440	32552.08333			6043.4			
12			0.52	110	400.00	25.00	25	440	32552.08333			4726.4			
13			0.593	125	400.00	25.00	25	500	32552.08333			6984.8			
14			0.577	105	400.00	25.00	25	420	32552.08333			5554.9			
15			0.666	115	400.00	25.00	25	460	32552.08333			8105.5			
16			0.424	120	400.00	25.00	25	480	32552.08333			3428.0			

Página 3

Página 4

Página 5

MOEdin\_1.xls [Modo de Compatibilidade] - Excel

FICHEIRO BASE INSERIR ESQUEMA DE PÁGINA FÓRMULAS DADOS REVER VER

João Cunha

Área de Transferência Tipo de Letra Alinhamento Número

Formatação Condicional Formatar como Tabela Estilos de Célula Inserir Eliminar Formatar Células

Soma Automática Preenchimento Limpar Ordenar e Localizar e Filtrar Selecionar Edição

W7 =4\*PI()^2\*P7^4\*N7^2\*S7\*Q7\*R7/4.72^4/T7\*(1+T7^49.48/P7^2/Q7/R7)/1000000

	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
	Zeit (Wochen)	Grindsonic (m sec)	Frequência (kHz)	Massa (g)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Densidade (kg/m³)	Inércia (mm⁴)			dyn. MOE (N/mm²)	Atro [g]	Mass loss [%]	
1															
2															
3															
4															
5															
6															
7			0.513	30	300.00	15.00	15	444.4444444	4218.75			4060.5			
8			0.686	30	300.00	15.00	15	444.4444444	4218.75			7261.0			
9			0.607	30	300.00	15.00	15	444.4444444	4218.75			5684.9			
10			0.561	30	300.00	15.00	15	444.4444444	4218.75			4855.9			
11			0.588	110	400.00	25.00	25	440	32552.08333			6043.4			
12			0.52	110	400.00	25.00	25	440	32552.08333			4726.4			
13			0.593	125	400.00	25.00	25	500	32552.08333			6984.8			
14			0.577	105	400.00	25.00	25	420	32552.08333			5554.9			
15			0.666	115	400.00	25.00	25	460	32552.08333			8105.5			
16			0.424	120	400.00	25.00	25	480	32552.08333			3428.0			

Página 3

Página 4

Página 5

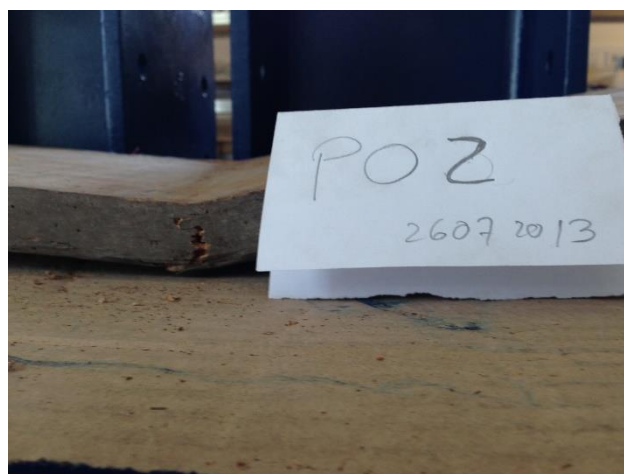
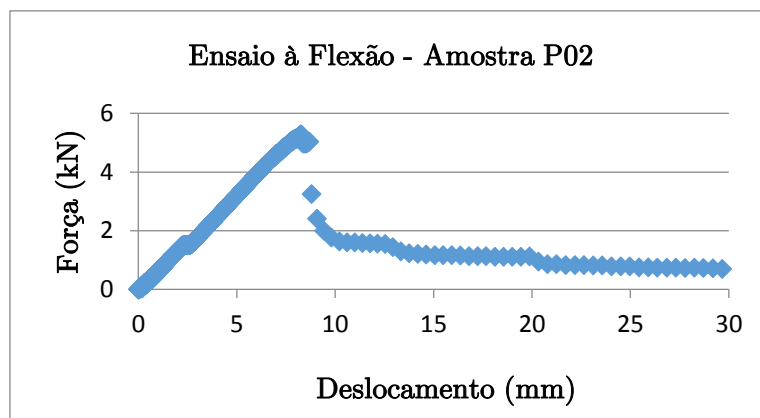
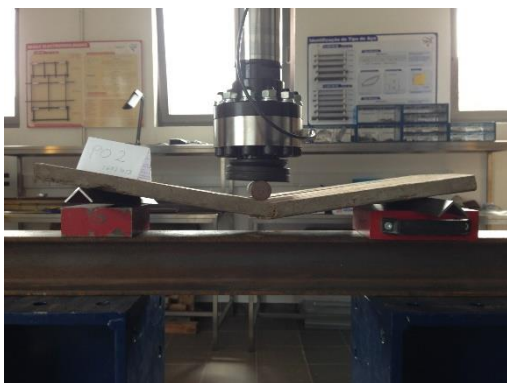
- Ensaio à Flexão

	t (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)
<b>P02</b>	26	520	570
<b>P03</b>	27	540	590
<b>P05</b>	35	700	750
<b>P08</b>	33	660	710
<b>P12</b>	32	640	690

	F <sub>máx</sub>	F1	F2	a1	a2	b
<b>P02</b>	5.283	0.5283	2.1132	0.833438	3.46499	300
<b>P03</b>	6.711	0.6711	2.6844	1.239703	4.851309	297
<b>P05</b>	3.918	0.3918	1.5672	3.797017	7.376266	185
<b>P08</b>	3.819	0.3819	1.5276	1.179575	4.416447	180
<b>P12</b>						

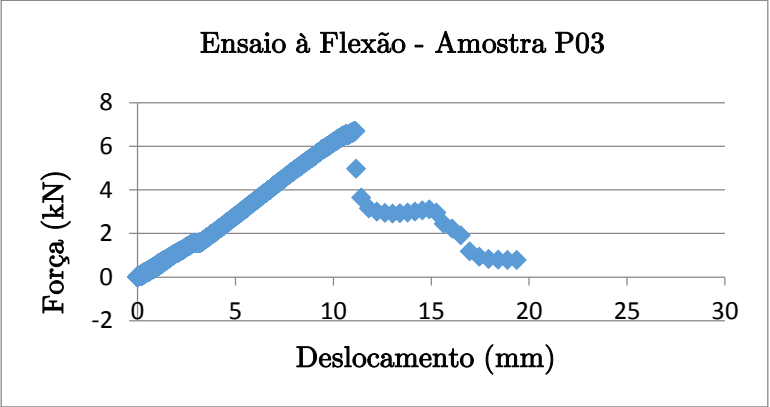
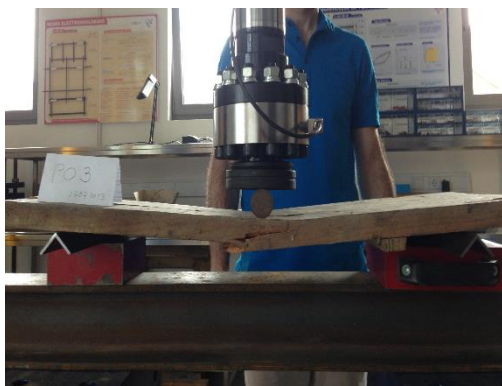
	MOE (Gpa)	Resistência à flexão (Mpa)
<b>P02</b>	4.015	20.319
<b>P03</b>	3.754	25.107
<b>P05</b>	3.550	18.153
<b>P08</b>	3.933	19.288
<b>P12</b>		

## Amostra P02

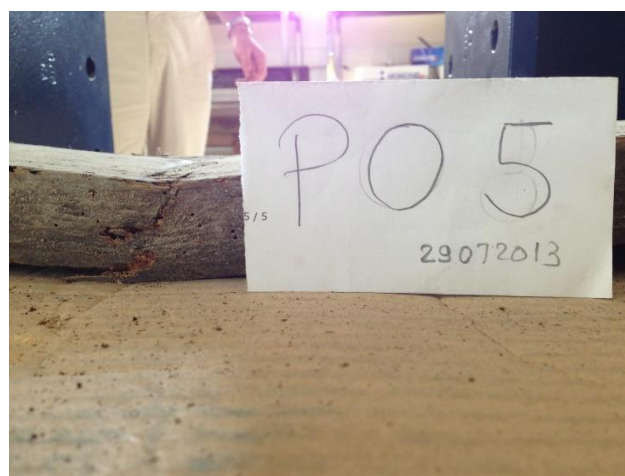
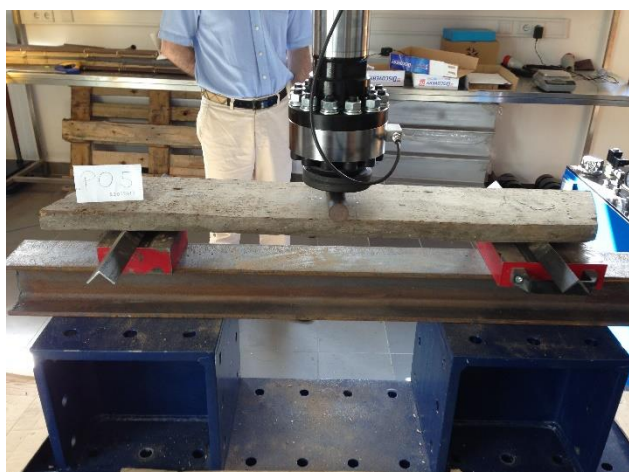
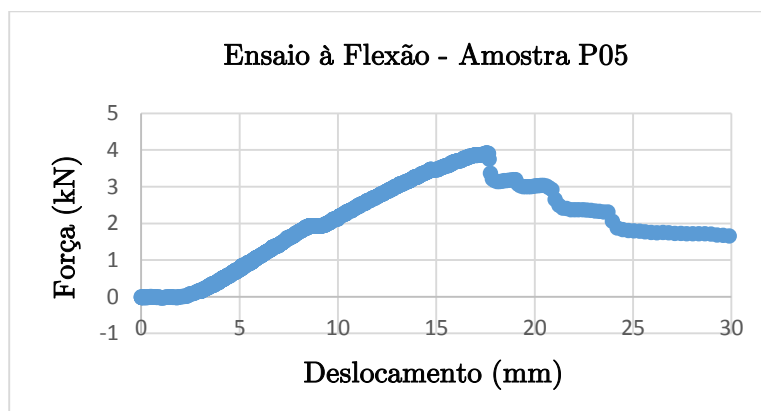




Amostra P03

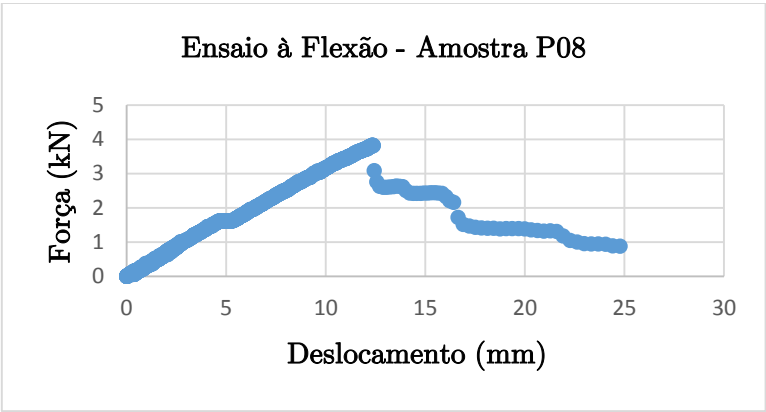


## Amostra P05





Amostra P08





## Amostra P12

